

Technische Universität München
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze

Entwurf und Evaluierung von Protokollen für die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug

Dipl.-Ing. (Univ.) Thomas Gehrsitz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. sc.techn. Andreas Herkersdorf
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kellerer
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik

Die Dissertation wurde am 17.11.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 31.03.2016 angenommen.

Entwurf und Evaluierung von Protokollen für die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug

Dipl.-Ing. (Univ.) Thomas Gehrsitz

17. November 2015

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer, der mir nach meiner Diplomarbeit am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze die Gelegenheit eröffnete, wissenschaftlich zu arbeiten und meine Promotion zu beginnen. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kellerer bedanken, der nach der Übergabe des Lehrstuhls die Betreuung meiner Promotion übernahm. Durch gemeinsame Gespräche und Diskussionen sowohl mit Prof. Eberspächer als auch mit Prof. Kellerer erhielt ich viele wertvolle Denkanstöße, die meiner wissenschaftlichen Arbeit zugutekamen und zum stetigen Vorankommen beitrugen.

Ebenfalls gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik, der sich freundlicherweise dazu bereit erklärte, das Zweitgutachten in meinem Promotionsverfahren zu übernehmen.

Die Ergebnisse meiner Arbeit basieren zum großen Teil auf zwei Industrieprojekten mit der BMW Group Forschung und Technik GmbH. Themen der Projekte waren die Flexibilisierung und Vereinfachung des Fahrzeugkabelbaums (CAR@TUM Kooperationsprojekt FlexKab) und der Einsatz der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug. An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Projektpartnern und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Helmut Kellermann, der die Projekte seitens BMW betreute, für die erfolgreiche Zusammenarbeit danken.

Ebenso möchte ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze für die stets freundschaftliche und angenehme Arbeitsatmosphäre sowie für die regen wissenschaftlichen Diskussionen danken. Neben meinen Kollegen gilt mein Dank auch den vielen Studenten, die ich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl betreuen durfte und welche wertvolle Beiträge zu meiner Arbeit leisteten.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Monika und Horst sowie meiner Schwester Sabine Götz, die immer für mich da sind und mich stets bei meinen Entscheidungen unterstützen.

München, im Oktober 2015

Thomas Gehrsitz

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Flexibilisierung und Vereinfachung von Fahrzeugbordnetzen durch die Reduzierung der Anzahl an Kommunikationsleitungen im Kabelbaum betrachtet. Neben Wirkungsbereichsmessungen und der Betrachtung von Koexistenzmechanismen gängiger Funkssysteme werden schwerpunktmäßig Protokolle für die Powerline-Kommunikation untersucht und Modifikationen für den Einsatz im Fahrzeug vorgeschlagen. Um die Kosten der Komponenten zu reduzieren, bauen die Protokolle auf bestehenden Standards auf. Als Grundlage dient der HomePlug Green PHY Standard, der eine robuste Übertragung für Smart Grids bereitstellt. Die Kerneigenschaft des vorgeschlagenen PR MAC Protokolls ist die Auflösung von Nachrichtenprioritäten vor der Übertragung. Durch die Verwendung von eindeutigen Nachrichten-IDs als Prioritäten werden Botschaften kollisionsfrei übertragen. Weiterhin werden Anpassungen vorgeschlagen, um den Energieverbrauch des Gesamtsystems zu reduzieren. Durch die Verwendung von Subsystemen in Kombination mit einem zusätzlichen Ankündigungsslot vor der Prioritätsauflösung kann die Einschaltdauer der Transceiver deutlich reduziert werden. Das Echtzeitverhalten der Protokolle wird untersucht, um für die Botschaften eine obere Grenze der Antwortzeiten zu garantieren. Zuletzt wird ein modifizierter Algorithmus gegeben, der die Prioritätsreihenfolge mit maximaler Robustheit in Hinblick auf zukünftig hinzukommende Botschaften identifiziert.

Abstract

In this thesis, two approaches to increase flexibility and reduce complexity of the vehicle's electrical communication system by decreasing the number of communication wires in the wiring harness are addressed. Measurements of the interference area of prevalent wireless communication systems are presented and coexistence mechanisms are examined. Furthermore, power line communication protocols are analyzed and modifications for the in-car application are proposed. In order to reduce the components' costs, protocols are based on existing standards. The HomePlug Green PHY standard is used as basis, as it provides a robust communication for smart grids. The key property of the proposed PR MAC protocol is the resolution of message priorities prior to frame transmission. By using unique message IDs as priorities, frames are transmitted without collisions. Further modifications are proposed in order to reduce the overall power consumption. When using subsystems in combination with an additional indication slot, the transceivers' power-on time is considerably reduced. The protocol's real-time behavior is examined in order to guarantee an upper bound for messages' response times. Lastly, a modified algorithm is given which identifies the priority ordering with maximum robustness regarding an increasing number of messages in the future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Beitrag der Arbeit	3
1.3	Struktur	5
2	Architektur von Bordnetzen	9
2.1	Bordnetze	9
2.2	Stand der Technik: Bussysteme im Fahrzeug	10
2.2.1	Controller Area Network	12
2.2.2	Local Interconnect Network	13
2.2.3	FlexRay	15
2.2.4	Media Oriented System Transport	16
2.2.5	Ethernet	17
2.3	Zukünftige Bordnetze	18
2.3.1	Herausforderungen	19
2.3.2	Powerline-Kommunikation im Fahrzeug	20
2.4	Vergleich der Technologien	20
2.5	Kommunikationsanforderungen	22
2.5.1	Use Case: Local Interconnect Network	23
2.5.2	Bestehende LIN-Infrastruktur	24
2.5.3	Kommunikationsanalyse	24
2.5.4	Datenrate und Framerate	27
2.6	Zusammenfassung	30
3	Funkkommunikation im Fahrzeug	31
3.1	Nutzung der ISM-Bänder	31
3.2	Anwendungsbereiche	32
3.3	Koexistenzuntersuchungen	33
3.3.1	Messtechnische Bestimmung des Pfadverlusts	33
3.3.2	Koexistenz von Funksystemen	44
3.3.3	Verbesserung der Koexistenz	46
3.4	Zusammenfassung	47
4	Powerline-Kommunikation als Ersatz der LIN-Verkabelung	49
4.1	Einführung in die Powerline-Kommunikation	49
4.2	Bestehende Standards	50
4.2.1	HomePlug	50
4.2.2	ITU-T G.hn	58

4.2.3	HD-PLC	61
4.2.4	IEEE 1901	62
4.2.5	Fazit	62
4.3	Auswirkungen auf die Topologie	63
4.4	Anforderungen an ein automotive PLC-Protokoll	63
4.5	Zusammenfassung	65
5	CarPlug Green PHY	67
5.1	Eignung für den Einsatz im Fahrzeug	67
5.1.1	LIN over Green PHY	69
5.1.2	Optimierungsmöglichkeiten	71
5.1.3	Nutzdatenübertragung in der Frame Control	73
5.2	Untersuchung des CSMA/CA Protokolls	76
5.2.1	OMNeT++ Simulationsframework	76
5.2.2	Verwendete Parameter	79
5.2.3	Szenarien	80
5.2.4	Simulationsergebnisse	81
5.2.5	Dynamische Repriorisierung	90
5.2.6	Fazit	93
5.3	Modifizierte CarPlug Green PHY Protokolle	94
5.3.1	TDMA	94
5.3.2	TDMA mit verkürzten Slots	96
5.3.3	Prioritätsbasierter Medienzugriff: PR MAC	98
5.3.4	Kombination der Verfahren	101
5.3.5	Fazit	101
5.4	Anforderungen an ein optimiertes Protokoll	102
5.5	Zusammenfassung	105
6	Energieeffizienz	107
6.1	Abschätzung des Energiebedarfs	107
6.2	Energieeffiziente MAC Protokolle	108
6.2.1	PR MAC mit Ankündigungsslot: PR+ MAC	109
6.2.2	PR MAC mit rotierendem Präfix: Rot MAC	109
6.2.3	Hierarchischer Medienzugriff	110
6.3	Untersuchung der modifizierten Protokolle	111
6.3.1	Maximaler Durchsatz	112
6.3.2	Verzögerung	113
6.3.3	Energieverbrauch	115
6.3.4	Flexibilität	118
6.3.5	Fazit	118
6.4	Kombiniertes Zugriffsverfahren: Rot+ MAC	119
6.5	Erweiterter Energiesparmodus	122
6.6	Zusammenfassung	122

7	Echtzeitverhalten	125
7.1	Systemmodell	126
7.2	Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeit	127
7.3	Prioritätszuteilung	132
7.3.1	Robuste Prioritätsreihenfolge	133
7.3.2	Reservierung und Zuteilung der IDs	137
7.4	Zusammenfassung	141
8	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Abkürzungsverzeichnis	147
	Abbildungsverzeichnis	151
	Tabellenverzeichnis	153
	Literaturverzeichnis	155

1 Einleitung

In vielen Lebensbereichen ist ein Anstieg des Kommunikationsbedarfs elektronischer Geräte zu beobachten. Dieser Trend setzt sich auch in modernen Fahrzeugen fort. Die rasche Entwicklung im Bereich der Elektronik führt zu einem schnellen Anwachsen der Anzahl an Funktionen in aktuellen Fahrzeugen. Für eine Vielzahl der Funktionen werden bereits heute Informationen aus den unterschiedlichsten Bereichen des Fahrzeugs benötigt. Der Kommunikation der beteiligten Steuergeräte kommt daher eine wichtige Rolle zu. Durch spezielle Anforderungen an die Kommunikation sowie aus Kostengründen wurden in den vergangenen 35 Jahren verschiedene Bussysteme für unterschiedliche Anwendungsbereiche entwickelt.

Die hohe Anzahl an Steuergeräten und deren stetig steigender Kommunikationsbedarf führen zu einem raschen Anwachsen der Komplexität des für die Vernetzung nötigen Kabelbaums. Die vielen Leitungen und Geräte stellen eine große Herausforderung für die Planung, Entwicklung, den Verbau und die Wartung dar. Außerdem steigen Kosten und Gewicht, was sich wiederum negativ auf den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch, die CO₂-Emission sowie die Reichweite des Fahrzeugs auswirkt.

1.1 Motivation

Über die Jahre ist die Anzahl an Kommunikationssystemen im Fahrzeug rasch angestiegen. Wurde die Grenze der Übertragungskapazität eines Kommunikationssystems erreicht, so wurden meist weitere Bussegmente hinzugefügt. Dies führt dazu, dass in aktuellen Fahrzeugen eine hohe Anzahl verschiedener Bussysteme parallel im Einsatz ist. Dadurch steigt nicht nur die Komplexität, sondern auch das Gewicht und die Kosten des Kabelbaums. Hinzu kommt, dass üblicherweise für jede Fahrzeugkonfiguration in Abhängigkeit der Ausstattungsvariante und gewählter Sonderausstattung ein spezieller Kabelbaum gefertigt wird. Hierdurch entstehen weitere Kosten für die Logistik und Fertigung, da ein Kabelbaum jeweils nur für eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration eingesetzt werden kann. Weiterhin schränkt der begrenzt vorhandene Bauraum die Verlegung dicker Kabelstränge ein.

Ziel zukünftiger Fahrzeugarchitekturen ist daher die Flexibilisierung und Vereinfachung des Kabelbaums. Zur Erreichung dieses Ziels existieren verschiedene Ansätze. Zum einen können vorhandene Leitungen mehrfach genutzt werden, zum anderen

können diese durch drahtlose Kommunikationstechnik ersetzt werden. Mit Hilfe dieser Ansätze führt eine Änderung in der Konfiguration des Fahrzeugs nicht zwangsläufig zu einem angepassten und speziell gefertigten Kabelbaum, wodurch die Flexibilität erhöht wird.

Funktechnologien spielen heutzutage eine wichtige Rolle und sind aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Mit unterschiedlichsten Endgeräten wird sowohl im häuslichen Umfeld, als auch unterwegs über eine Vielzahl von Technologien kommuniziert. Beispiele hierfür sind Wireless Local Area Network (WLAN), das auch als IEEE 802.11 Standard des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) bekannt ist, Bluetooth oder Mobilfunkstandards wie GSM (Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) oder LTE (Long Term Evolution). Durch die weite Verbreitung dieser Technologien und die damit vergleichsweise geringen Kosten der Komponenten ist der Einsatz von Funktechnologien im Fahrzeug ein potenzieller Anwendungsbereich. Es zeigt sich jedoch, dass die Funkkommunikation aufgrund einer hohen Anzahl möglicher Störquellen nur für Funktionen mit geringen Sicherheitsanforderungen geeignet ist.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, vorhandene Leitungen gleichzeitig sowohl zur Energieversorgung als auch für die Kommunikation zu nutzen. Zwei Ansätze sind dabei zu unterscheiden: Die zusätzliche Energieversorgung über bestehende Datenleitungen, auch bekannt als Power over Data (PoD), sowie die Übertragung von Daten über bestehende Energieversorgungsleitungen, was als Power Line Communication (PLC) bezeichnet wird. Der wesentliche Unterschied beider Varianten ist die Art der verwendeten Leitungen. Kabel für die Übertragung von Daten sind in der Regel dünner und nicht geeignet, Verbraucher mit hohem Energiebedarf zu versorgen. Leitungen zur Energieversorgung dagegen sind meist dicker und können daher höhere Ströme transportieren. Dickere Leitungen bzw. Litzen haben jedoch den Nachteil, dass der Leitungswiderstand mit zunehmender Frequenz durch den Skin-Effekt ansteigt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Powerline-Kommunikation, für deren Einsatz lediglich die ohnehin vorhandenen Leitungen zur Stromversorgung nötig sind. Für die Vernetzung im Heimbereich sind bereits einige PLC-Lösungen verfügbar, durch deren Nutzung die Kosten reduziert werden können. Neben der physikalischen Übertragung in einem Fahrzeug muss auch der Medienzugriff (Media Access Control, MAC) den Anforderungen im Automobilbereich gerecht werden. Zu den Herausforderungen gehört unter anderem die effiziente und zuverlässige Übertragung ereignisbasierter Botschaften mit geringen Verzögerungen zwischen einer hohen Anzahl an Teilnehmern. Weiterhin spielt auch die Energieeffizienz eine wichtige Rolle. Im folgenden Abschnitt wird erläutert, welchen Beitrag die vorliegende Arbeit leistet.

1.2 Beitrag der Arbeit

Ausgehend vom Stand der Technik werden in diesem Abschnitt die Beiträge der Arbeit herausgestellt. Bereits in den 90er Jahren wurde der Einsatz der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug untersucht. Die Verwendung von Code Division Multiple Access (CDMA) auf Stromleitungen in Automotive Area Networks wurde 1994 von Nouvel u. a. [NZC94] diskutiert. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde von Beikirch u. a. [BV00] die Möglichkeit der Realisierung eines CAN-Transceivers (Controller Area Network) mittels Powerline-Kommunikation untersucht. Als Ergebnis stellten sie in ihrer Untersuchung im Jahre 2000 fest, dass die Entwicklung eines Powerline-Interfaces für CAN in naher Zukunft realisierbar zu sein scheint.

Mit der weiteren Entwicklung der Powerline-Kommunikation im Bereich der Heimvernetzung in den folgenden Jahren nahm auch das wissenschaftliche Interesse am Einsatz von PLC in Fahrzeugen zu. In [VRF03] wird das Potential der Powerline-Kommunikation im Vergleich zur traditionellen Verkabelung im Fahrzeug herausgestellt. Weiterhin wird erwähnt, dass Datenraten von bis zu 14 Mbit/s möglich sind. In den darauffolgenden Jahren wurde überwiegend die physikalische Schicht im Fahrzeug untersucht. Gourret u. a. führten in [GNEZ07b] und [GNEZ07a] Messungen von PLC-Systemen mit Mehrträger-Modulation durch. Als PLC-Modem kam zum einen ein Gerät zum Einsatz, welches den HomePlug Standard implementiert, zum anderen ein proprietäres Modem der Firma Spidcom. In dem Testszenario lag die maximal erreichte Datenrate bei 20 Mbit/s. Neben den Messungen werden auch Simulationsergebnisse zur Bitfehlerwahrscheinlichkeit in verschiedenen Szenarien präsentiert.

Der Einfluss von impulsartigen Störern wird in [DLD⁺08] mit Hilfe von Messungen im Zeitbereich in fünf unterschiedlichen Fahrzeugen untersucht. Die Dauer der Störimpulse kann je nach Szenario deutlich voneinander abweichen. Für ein stehendes Fahrzeug mit laufendem Motor wurden Impulse mit einer Dauer von 100 μ s bis 1 ms festgestellt.

In [TNM09] werden Ergebnisse von Messungen mit zwei für den Heimgebrauch erhältlichen PLC-Modems präsentiert. Die verwendeten Standards sind HomePlug AV und HD-PLC, welche ebenfalls in dieser Arbeit betrachtet werden. Neben Messungen auf der physikalischen Schicht bei verschiedenen Pfaden und Szenarien im Fahrzeug wurde auch der TCP-Durchsatz (Transmission Control Protocol) bezogen auf die Nutzdaten (Goodput) gemessen. Es wird angegeben, dass beide PLC-Standards jeweils zwei Medienzugriffsverfahren bereitstellen. Jedoch wird nicht erwähnt, welches Zugriffsverfahren für die Messungen zum Einsatz kam. Weiterhin wurden lediglich direkte Pfade betrachtet, wodurch kein konkurrierender Zugriff mehrerer Teilnehmer auf den Kanal entsteht. Je nach Pfad, Szenario und Modem liegen die gemessenen Datenraten im Bereich von 15-49 Mbit/s.

Ein Überblick über bisherige Untersuchungen der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug wird in [NPTP11] gegeben. Ausgehend von PLC-Standards für die hausinterne Verwendung wird deren Einsatz im Fahrzeug diskutiert. Weiterhin werden Mes-

sungen des Durchsatzes sowie der physikalischen Schicht präsentiert. Zusätzlich wird auch die drahtlose Kommunikation adressiert. Die Autoren stellen eine Architektur in Aussicht, in der Steuergeräte dynamisch zwischen den Kommunikationstechnologien wechseln können. Eine Neukonfiguration der Steuergeräte wird anhand von Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) diskutiert.

Weitere aktuelle Veröffentlichungen zur Powerline-Kommunikation im Fahrzeug beschäftigen sich ebenfalls mit Messungen der physikalischen Schicht [ADPT13] oder mit der stochastischen Modellierung von PLC-Kanälen [SC14].

Ein ähnliches Anwendungsgebiet stellt die Powerline-Kommunikation in Flugzeugen dar. In [DJL⁺13] wird die Verwendung von PLC für die Anbindung der Kabinenbeleuchtung sowie des Kommunikationssystems als erstes Szenario diskutiert. Zusätzlich werden Ergebnisse von Messungen des Übertragungskanals präsentiert. Der Einsatz kommerzieller PLC-Produkte im Flugzeug wird in [DSS⁺12] umfassend behandelt. Anhand eines PLC-Demonstrators wurden verschiedene Tests und Messungen des Durchsatzes durchgeführt. Die Autoren stellten fest, dass für den Einsatz von PLC in Flugzeugen ein deterministisches Medienzugriffsprotokoll benötigt wird. Wegen der vergleichsweise geringen Stückzahlen im Flugzeugbau wird angegeben, dass es sinnvoll ist, auf die physikalischen Schichten bestehender PLC-Lösungen aufzubauen.

Basierend auf dem Stand der Technik zur Powerline-Kommunikation in Fahrzeugen sowie Flugzeugkabinen ist festzustellen, dass sich die Untersuchungen weitgehend auf die physikalische Schicht konzentrieren. Durch diese Untersuchungen wird gezeigt, dass die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug realisierbar ist. Die Notwendigkeit der Anpassung des Medienzugriffs wurde bisher lediglich im Bereich der Avionik festgestellt. Ein konkreter Vorschlag wird jedoch nicht gegeben.

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit stellt die Flexibilisierung und Vereinfachung des Fahrzeugkabelbaums dar. Durch die Verringerung der Anzahl an Leitungen können Kosten in verschiedenen Bereichen, wie der Entwicklung, Fertigung sowie der Montage, reduziert werden. Es bestehen zwei grundlegende Ansätze wie diese Ziele erreicht werden können. Sowohl durch den Einsatz drahtloser Kommunikationstechnik als auch durch die Powerline-Kommunikation entfällt die Notwendigkeit zusätzlicher Leitungen zur Datenübertragung.

Zur drahtlosen Kommunikation werden in dieser Arbeit Ergebnisse von Messungen vorgestellt, mit deren Hilfe der **Einflussbereich von Funksystemen** im Fahrzeug bestimmt wird. Zusätzlich wird die **Koexistenz von Funktechnologien** betrachtet, die sich in der Fahrzeugkabine befinden. Aufgrund der Vielzahl möglicher Störungen ist der Einsatz von Funksystemen jedoch nur für einige wenige Funktionen mit geringer Sicherheitsanforderung geeignet. Bei der Powerline-Kommunikation sind Störungen aus dem Fahrzeugumfeld weitestgehend auszuschließen, wodurch sich PLC prinzipiell für eine Vielzahl an Funktionen eignet. In der vorliegenden Arbeit werden daher **Medienzugriffsverfahren für die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug** im Detail untersucht.

Es existieren bereits viele Medienzugriffsprotokolle, die für die Übertragung auf einem geteilten Medium wie den Energieleitungen genutzt werden können. Jedoch sind diese in der Regel nicht an die besonderen Kommunikationsanforderungen in Fahrzeugen angepasst. Ausgehend von der aktuellen Architektur von Bordnetzen werden in dieser Arbeit **Anforderungen an ein zukünftiges PLC-Protokoll** hergeleitet. Niedrige Kosten stellen in der Automobilindustrie stets das übergeordnete Ziel dar. Zusätzlich sind die Stückzahlen im automobilen Umfeld vergleichsweise gering. Daher werden bestehende Standards und somit Standardkomponenten auf die Eignung für den Einsatz im Fahrzeug geprüft. Der HomePlug Green PHY Standard [HPG10] wird als Basis ausgewählt, da dieser auf eine robuste Kommunikation für Smart Grid Anwendungen ausgelegt ist und die Kosten durch eine vereinfachte Hardware reduziert. Aufbauend auf diesem Standard werden Modifikationen entworfen, welche die Übertragung hinsichtlich der Anforderungen der Fahrzeugkommunikation optimieren. Die vorgeschlagenen **prioritätsbasierten Medienzugriffsprotokolle** zur Powerline-Kommunikation im Fahrzeug basieren auf Nachrichtenprioritäten, wobei stets die Botschaft mit der höchsten Priorität übertragen wird.

Neben dem Medienzugriff spielt auch die **Energieeffizienz** eine wichtige Rolle, da davon auszugehen ist, dass der Energieverbrauch bestehender PLC-Transceiver vergleichsweise hoch ausfällt. Aus diesem Grund werden **weitere Modifikationen am Medienzugriffsprotokoll** entwickelt, durch welche der Energieverbrauch gesenkt werden kann.

Bevor ein neues System im Fahrzeug eingesetzt werden kann, ist die Kenntnis des Echtzeitverhaltens nötig, um bestimmten Funktionen die Übertragung innerhalb einer oberen Grenze der Verzögerung zu garantieren. Daher wird das **Echtzeitverhalten der neu konzipierten Protokolle** untersucht. Die **Berechnung von Worst-Case-Antwortzeiten** in Abhängigkeit der Nachrichtenpriorität ist zentraler Bestandteil der Untersuchung. Weiterhin hat die Reihenfolge der Prioritätsvergabe einen entscheidenden Einfluss auf die Worst-Case-Antwortzeiten. In der vorliegenden Arbeit wird ein erweiterter Algorithmus vorgeschlagen, mit dessen Hilfe die **Prioritätsreihenfolge mit maximaler Robustheit** in Bezug auf zukünftig hinzukommende Botschaften identifiziert wird. Zuletzt wird die **Reservierung und Vergabe von Nachrichten-IDs** mit dem Ziel einer Erhöhung der Flexibilität für zukünftige Veränderungen in der Verkehrszusammensetzung diskutiert.

1.3 Struktur

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den weiteren Aufbau der Arbeit gegeben. Eine grafische Übersicht der Struktur mit den Kapiteln 2 bis 7 ist in Abbildung 1.1 dargestellt. In Kapitel 2 wird eine Einführung in die Grundlagen der Architektur von Fahrzeugbordnetzen gegeben. Neben dem Aufbau von Bordnetzen werden häufig verwendete Bussysteme sowie deren Anwendungsbereiche erläutert. Weiterhin wird auf Herausforderungen und Kommunikationsanforderungen eingegangen,

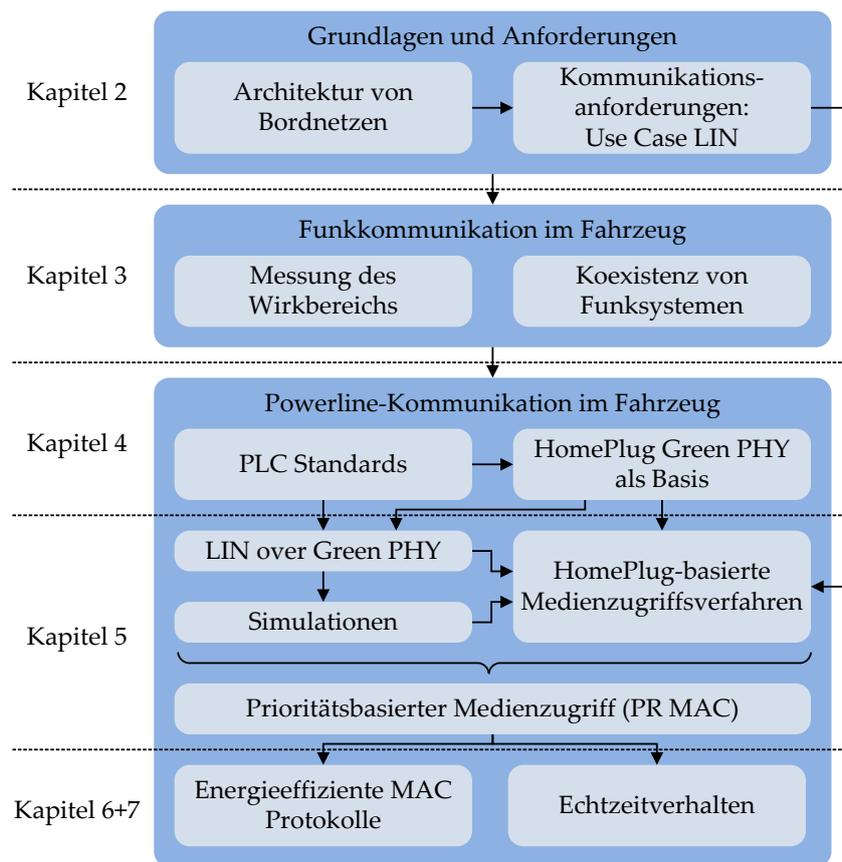


Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

die es für zukünftige Bordnetze zu adressieren gilt. Abschließend wird eine Kommunikationsanalyse der LIN-Busse (Local Interconnect Network) gegeben, die als Use Case für eine erste Realisierung eines PLC-Systems im Fahrzeug dienen.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Funkkommunikation im Fahrzeug, durch die ebenso wie durch PLC die Anzahl an Leitungen reduziert und die Flexibilität erhöht werden kann. Der Fokus liegt auf Systemen, die in lizenzfreien Frequenzbändern arbeiten. Die Ergebnisse von Messungen des winkel- und distanzabhängigen Pfadverlusts in verschiedenen Szenarien werden präsentiert und Empfehlungen für den Verbauort von Antennen gegeben. Die Koexistenz von Funksystemen im Fahrzeug ist ein weiterer Schwerpunkt des Kapitels.

Die Kapitel 4 bis 7 behandeln die Powerline-Kommunikation im Detail. Kapitel 4 gibt eine Übersicht über bestehende PLC-Standards, welche bereits weit verbreitet sind und sich prinzipiell für den Einsatz im Fahrzeug eignen. Als Ergebnis der Betrachtung bestehender Standards zeigt sich, dass der HomePlug Green PHY Standard, welcher einer im Umfang reduzierten Version des HomePlug AV Standards entspricht, durch die vereinfachte und somit kostengünstigere Hardware ein hohes Potential für die Kommunikation in Fahrzeugen besitzt.

In Kapitel 5 wird der HomePlug Green PHY Standard auf die Eignung als Ersatz der LIN-Infrastruktur untersucht. Um den Overhead des Protokolls zu reduzieren, wird eine Modifikation vorgeschlagen, die je nach Hardware unter Umständen bereits durch eine Anpassung in der Firmware realisiert werden kann. Simulationen mit dem modifizierten Medienzugriff zeigen, dass die aktuelle LIN-Infrastruktur durch das betrachtete PLC-System ersetzt werden kann. Da allerdings mit einer deutlichen Zunahme des Verkehrsaufkommens im Fahrzeug gerechnet wird, ist das System nicht zukunftssicher. Weiterhin ist die Zuverlässigkeit der Übertragung durch mögliche Kollisionen nicht sichergestellt. Aus diesem Grund werden weitere Medienzugriffsprotokolle entwickelt, die weitgehend auf dem HomePlug Standard basieren. Als Fazit des Kapitels zeigt sich, dass der prioritätsbasierte Medienzugriff (PR MAC) das höchste Potential für den Ersatz der LIN-Infrastruktur aufweist.

Auf die Energieeffizienz wird in Kapitel 6 eingegangen. Es wird erwartet, dass der Energieverbrauch eines PLC-Transceivers deutlich über dem eines LIN-Transceivers liegt. Durch Erweiterungen des PR MAC Protokolls kann die Einschaltdauer der Transceiver je nach Station und Kommunikationsbedarf teilweise deutlich reduziert werden, wodurch der Energieverbrauch gesenkt wird.

Als Abschluss wird eine Methode zur Untersuchung des Echtzeitverhaltens bei Verwendung des PR MAC Protokolls in Kapitel 7 dargelegt. Neben der Berechnung von Worst-Case-Antwortzeiten wird ein erweiterter Algorithmus vorgeschlagen. Dieser maximiert die Robustheit der Prioritätsreihenfolge, um eine hohe Anzahl an Nachrichten in Zukunft hinzufügen zu können, ohne die Echtzeitanforderungen bestehender Nachrichten zu verletzen. Zuletzt werden Möglichkeiten der Reservierung von Nachrichten-IDs diskutiert, um die Flexibilität in Bezug auf Änderungen in der Verkehrszusammensetzung zu erhöhen.

2 Architektur von Bordnetzen

In diesem Kapitel wird zunächst der Begriff des Bordnetzes beschrieben. Im Anschluss werden in Fahrzeugen weit verbreitete Bussysteme vorgestellt und deren Anwendungsfelder angegeben. Ausgehend von heutigen Bordnetzen werden Herausforderungen und Anforderungen an Bordnetze der Zukunft abgeleitet. Eine vielversprechende Technologie ist die Powerline-Kommunikation, durch welche die Anzahl an Leitungen im Fahrzeug deutlich reduziert werden kann. Aus diesem Grund werden aktuelle Kommunikationsanforderungen diskutiert und ein Use Case für eine erste Realisierung eines PLC-Systems im Fahrzeug aufgezeigt.

2.1 Bordnetze

Der Begriff Bordnetz bezeichnet die Gesamtheit aller elektrischen und elektronischen Komponenten (E/E Komponenten) in unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Hierzu zählen Automobile, Schiffe, Züge und Flugzeuge. Das Bordnetz beinhaltet eine Vielzahl an Komponenten wie z.B. die Verkabelung inklusive Stecker, was als Kabelbaum bezeichnet wird, sowie alle Steuergeräte, Sensoren, Aktuatoren, Schalter, Anzeigegeräte und auch Generatoren oder Energiespeicher wie Batterien.

In [Ric09] ist dargestellt, wie sich das Bordnetz im Fahrzeug über die Jahre entwickelt hat. Bereits im Jahr 2000 wurden Oberklasse-Fahrzeuge vermarktet, die bei Vollausstattung bis zu 80 Steuergeräte aufweisen. Für deren Vernetzung sind bis zu 1900 einzelne Leitungen mit einer Gesamtlänge von ca. 4 km nötig. In den darauffolgenden Jahren sind auch Fahrzeuge mit größerer Anzahl an Steuergeräten sowie höheren Gesamtkabellängen auf dem Markt erschienen. Durch Umstrukturierungen im Bordnetz kann die Anzahl an Steuergeräten stark variieren und kurzfristig sogar reduziert werden. Langfristig ist jedoch mit einer weiteren Erhöhung zu rechnen. Neben der Anzahl an Leitungen spielt auch deren Gewicht eine bedeutende Rolle. In [Ric09] wird angegeben, dass der Kabelbaum durch die vielen Kupferleitungen ein Mehrgewicht von 30-40 kg bedeutet. Dieses zusätzliche Gewicht wirkt sich direkt auf den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch des Fahrzeugs aus.

In aktuellen Bordnetzen können die Leitungen in zwei Kategorien unterschieden werden. Ein Teil der Leitungen dient zur Stromversorgung der Steuergeräte, welche auch als Electronic Control Units (ECUs) bezeichnet werden. Der andere Teil enthält Leitungen, die zur Vernetzung der verteilten Systeme dienen. Diese Kommunikationsleitungen sind in der Regel durch Bussysteme oder Ringe realisiert. Als Bordnetz

wird in der vorliegenden Arbeit der Teil des Netzes bezeichnet, der zur Kommunikation dient. Da die Powerline-Kommunikation die Synergie beider Kategorien darstellt, entfällt mit deren Verwendung diese Unterscheidung.

2.2 Stand der Technik: Bussysteme im Fahrzeug

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kommunikationssysteme vorgestellt, die üblicherweise in heutigen Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Bevor digitale Datenbusse Einzug ins Fahrzeug hielten, wurden Leitungen mit diskreten (analogen) Signalen verwendet. Mit einer zunehmenden Anzahl an Funktionen und somit Steuergeräten ist die Komplexität der Verkabelung dadurch deutlich angestiegen. In den 80er Jahren startete aus diesem Grund die Entwicklung von Datenbussen für Fahrzeuge.

In der Automobilbranche spielen die Kosten stets eine wichtige Rolle. Daher wurden in den vergangenen 35 Jahren unterschiedliche Kommunikationssysteme für verschiedene Anwendungsbereiche entwickelt oder für den Einsatz im Fahrzeug angepasst. Die Verwendung spezieller Lösungen in den unterschiedlichen Bereichen ermöglicht einen optimierten Einsatz in Bezug auf Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Kosten. Jedoch entsteht dadurch ein heterogenes Gesamtsystem mit erhöhter Komplexität.

Ein Fahrzeugbordnetz ist üblicherweise in sogenannte Domänen unterteilt. Eine Domäne umfasst jeweils die Bereiche des Bordnetzes, die eine starke Bindung durch Funktionen aufweisen. Mit dieser Unterteilung können Funktionen mit vergleichbaren Anforderungen weitgehend getrennt von anderen Funktionen betrachtet und entwickelt werden. Oftmals werden diese Anforderungen durch eine spezielle Kommunikationstechnologie abgedeckt. Die Funktionsdomänen zeichnen sich daher meist durch spezifische Übertragungstechnologien aus. Übliche Domänen sind: Antriebsstrang (Powertrain), Karosserie und Komfort (Body and Comfort), Fahrgestell (Chassis), Sicherheit (Safety) und Infotainment. Informationen aus einigen Teilbereichen werden oft auch in anderen Bereichen benötigt, wodurch die Domänen nicht strikt voneinander getrennt sind. Ein Beispiel für eine solche Funktion ist ein Navigationssystem, das neben einem Signal wie GPS (Global Positioning System) auch die Informationen des Geschwindigkeits- oder Lenkwinkelsensors zur genaueren Positionsbestimmung verwendet. In Abhängigkeit der Anforderungen werden Steuergeräte an eine oder mehrere Kommunikationstechnologien angebunden. Über Gateways kann eine Kommunikation auch über die Grenzen einer Vernetzungstechnologie hinweg erfolgen.

In Abbildung 2.1 ist ein beispielhaftes Bordnetz mit fünf unterschiedlichen Kommunikationssystemen dargestellt, die zur Vernetzung der einzelnen Steuergeräte dienen, welche durch graue Rechtecke angedeutet sind. In heutigen Oberklasse-Fahrzeugen ist die Anzahl an Kommunikationssystemen in der Regel deutlich höher, als in Abbildung 2.1 gezeigt. Der Großteil der Kommunikationstechnologien ist oftmals mit

einem zentralen Gateway verbunden. Durch das Gateway können Steuergeräte miteinander kommunizieren, auch wenn sie nicht am selben Kommunikationssegment angeschlossen sind. Üblicherweise befindet sich am Gateway auch eine Diagnose-schnittstelle, da an dieser Stelle der Großteil der im Fahrzeug ausgetauschten Bot-schaften zusammenläuft.

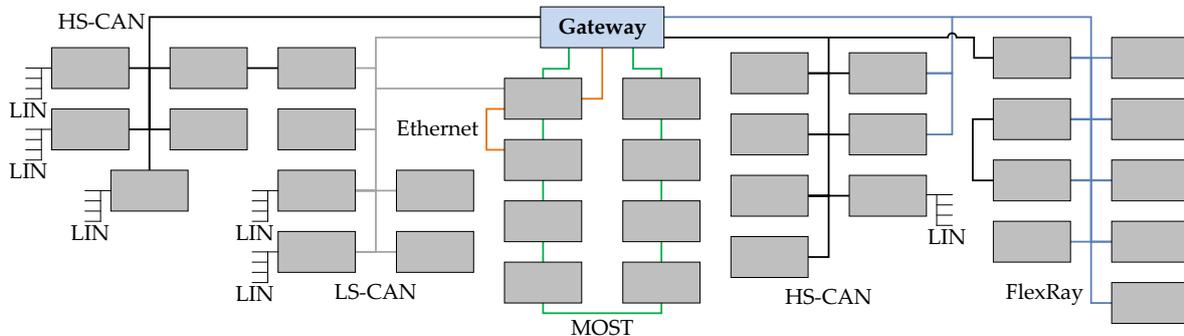


Abbildung 2.1: Beispielhafte Struktur eines Bordnetzes

In Tabelle 2.1 sind die Technologien aufgeführt, die in Abbildung 2.1 dargestellt sind. Weiterhin sind übliche Domänen sowie typische Datenraten angegeben. Die genannten Kommunikationstechnologien werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet. In [Kes09] wird ein Überblick über die Funktionsdomänen inklusive deren Anforderungen sowie über verschiedene Kommunikationssysteme im Fahrzeug gegeben.

Tabelle 2.1: Vernetzungstechnologien im Fahrzeug

Technologie	Domänen	Typische Datenrate
LIN	Karosserie und Komfort	≤ 20 kbit/s
LS-CAN	Karosserie und Komfort	100 kbit/s
HS-CAN	Antriebsstrang, Fahrgestell	500 kbit/s
FlexRay	Sicherheit	10 Mbit/s
MOST	Infotainment	50-150 Mbit/s
Ethernet	verschiedene	100 Mbit/s

Die LIN-Busse (Local Interconnect Network) bieten die geringsten Datenraten und werden üblicherweise für die Vernetzung im Karosserie- und Komfortbereich verwendet. Wie in Abbildung 2.1 angedeutet, sind viele der LIN-Busse über Steuergeräte angebunden, die wiederum über CAN-Busse (Controller Area Network) vernetzt sind. Der CAN-Bus existiert in zwei Varianten, dem Low Speed CAN (LS-CAN) sowie dem High Speed CAN (HS-CAN). CAN-Busse werden überwiegend im Bereich des Antriebsstrangs sowie des Fahrgestells eingesetzt. Der LS-CAN wird auch zur Vernetzung im Karosserie- und Komfortbereich verwendet. Für sicherheitskritische Funktionen wird FlexRay, im Infotainmentbereich häufig Media Oriented System Transport (MOST) eingesetzt. Weiterhin ist in Abbildung 2.1 der Einsatz von Ethernet im

Fahrzeug angedeutet. Eine Zuordnung zu einer bestimmten Domäne erfolgt an dieser Stelle nicht, da Ethernet im Fahrzeug prinzipiell für eine Vielzahl von Funktionen verwendet werden kann. Die Dissertation von Bernd Müller-Rathgeber [MR10] beschäftigt sich speziell mit dem Einsatz von Ethernet in zukünftigen Bordnetzen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Vernetzung verteilter Echtzeitsysteme in Fahrzeugen. Die wichtigsten Eigenschaften der Bussysteme werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.2.1 Controller Area Network

Um die Anzahl an Kabeln im Fahrzeug zu reduzieren, entwickelte die Robert Bosch GmbH zusammen mit Intel Anfang der 80er Jahre den CAN-Bus [CAN91]. Der Standard definiert die erste und zweite Schicht (Bitübertragungs- und Sicherungsschicht) des OSI-Modells (Open Systems Interconnection Modell). Der CAN-Bus ist ein serieller Bus und existiert in zwei Ausführungsvarianten, dem Low Speed CAN und dem High Speed CAN. Der Low Speed CAN ist mit einer maximalen Datenrate von 125 kbit/s definiert und wird üblicherweise mit 100 kbit/s betrieben. Der High Speed CAN unterstützt maximale Datenraten von 1 Mbit/s und wird in der Regel mit 500 kbit/s betrieben.

Auf der physikalischen Schicht nutzt CAN zwei Leitungen, die als CAN-High und CAN-Low bezeichnet werden und mit invertierten Pegeln arbeiten. Im Ruhezustand, der als rezessiver Zustand bezeichnet wird und der logischen „1“ entspricht, beträgt die Spannung auf beiden Leitungen 2,5 Volt. Im dominanten Zustand (logische „0“) steigt die Spannung auf dem CAN-High um mindestens 1 Volt an, auf dem CAN-Low fällt sie um mindestens 1 Volt ab. Im rezessiven Zustand beträgt die Spannungsdifferenz daher 0 Volt, bei dominantem Zustand mindestens 2 Volt.

Der CAN-Bus ist ein Multi-Master Bussystem. Der kollisionsfreie Zugriff auf den Kanal erfolgt durch eine Prioritätsauflösung, die auch als Arbitrierung bezeichnet wird. In Abbildung 2.2 ist der Aufbau eines Standard CAN-Frames¹ (CAN 2.0A) dargestellt. Neben dem Standard Frame mit einem 11 Bit Identifier existiert ein Extended Frame (CAN 2.0B) mit einem 29 Bit Identifier. Nach dem Start of Frame (SOF) wird im Arbitration Field des CAN-Frames der Identifier der Botschaft gefolgt von einem Remote Transmission Request (RTR) Bit übertragen. Das Control Field enthält unter anderem die Länge des Daten-Feldes, welches 1-8 Byte umfasst. Geschützt werden die Daten durch eine 15 Bit CRC-Prüfsumme (Cyclic Redundancy Check), auf die der CRC Delimiter folgt. Im ACK Slot des ACK Fields teilt ein Empfänger dem Sender den fehlerfreien Empfang mit. Der ACK Slot wird ebenfalls von einem Delimiter abgeschlossen. Im End of Frame Field wird das Ende des Frames durch sieben rezessive Bit-Pegel angezeigt. Zwischen zwei CAN-Frames ist ein Interframe Space (IFS) von mindestens drei Bit vorgesehen.

¹Übertragungseinheiten auf der Sicherungsschicht werden üblicherweise als Frame bezeichnet. In dieser Arbeit werden zusätzlich die Begriffe Nachricht und Botschaft als Synonym verwendet.

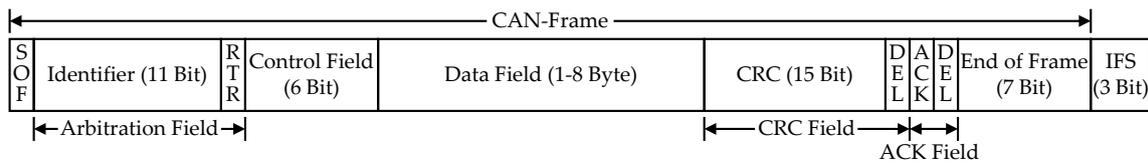


Abbildung 2.2: Aufbau eines Standard CAN-Frames (CAN 2.0A)

Für die Arbitrierung legt jede Station der Reihe nach die einzelnen Bit des CAN-Identifiers als dominante oder rezessive Pegel auf den Bus. Zeitgleich wird überwacht, ob der gesendete Pegel dem auf dem Bus anliegenden Pegel entspricht. Wird ein dominanter Pegel ausgesendet, ist dies stets der Fall. Sendet eine Station jedoch einen rezessiven Pegel und erkennt auf dem Kanal einen dominanten Pegel, stoppt die Station das Aussenden der ID an dieser Stelle, da eine andere Station einen Frame höherer Priorität auf dem Bus aussendet. Auf diese Weise wird die höchste Priorität auf dem Bussegment identifiziert, ohne dass eine Kollision entsteht. Jedoch hat das Verfahren auch den Nachteil, dass die Datenrate nicht beliebig erhöht werden kann, da jede Station innerhalb der Dauer eines Bit im Stande sein muss zu erkennen, ob eine andere Station einen Frame höherer Priorität aussendet. Somit ist die Länge des CAN-Busses und die Datenrate nach oben hin begrenzt. Bei einer Datenrate von 1 Mbit/s liegt die maximale Kabellänge noch bei ca. 40 m [Law10].

Um dem steigenden Kommunikationsbedarf gerecht zu werden, veröffentlichte die Robert Bosch GmbH im Jahr 2012 die CAN with Flexible Data-Rate (CAN FD) Spezifikation [CAN12]. CAN FD bietet zum einen eine erhöhte maximale Nutzdatenlänge von bis zu 64 Byte, zum anderen kann die Datenrate erhöht werden. Laut Spezifikation werden dazu zwei Datenraten definiert. Header und Trailer des Frames werden weiterhin mit den zuvor genannten Datenraten übertragen, was für die kollisionsfreie Arbitrierung nötig ist. Die Nutzdaten inklusive Prüfsumme können dagegen mit einer höheren Datenrate ausgesendet werden. Ein exakter Wert der erhöhten Datenrate ist im Standard nicht definiert. Es wird lediglich angegeben, dass alle Stationen in einem Segment dieselbe Datenrate verwenden. In [Har12] werden Obergrenzen für die Datenraten gegeben. Zusätzlich wird erwähnt, dass das Ziel von CAN FD für den Einsatz im Fahrzeug mit aktuellen CAN-Transceivern bei einer durchschnittlichen Datenrate von 2,5 Mbit/s liegt.

2.2.2 Local Interconnect Network

Mit zunehmender Anzahl an Komfortfunktionen entstand der Wunsch nach einem einfachen und kostengünstigen Fahrzeugbus. Zu diesem Zweck wurde Ende der 90er Jahre das LIN-Konsortium von verschiedenen Firmen gegründet. Zu den Gründungsmitgliedern gehören Audi, BMW, DaimlerChrysler, Volkswagen, Motorola und Volcano Communication Technologies [MSS09].

Für die physikalische Übertragung kommt eine Eindrahtleitung zum Einsatz. Ein rezessives Bit (logische „1“) entspricht einem Pegel von mindestens 60% der Versorgungsspannung V_{SUP} . Für den dominanten Pegel (logische „0“) dagegen darf die Spannung nicht mehr als 40% von V_{SUP} betragen. Die Versorgungsspannung entspricht der Spannung am Eingang des Steuergeräts und kann daher geringer als die Batteriespannung sein.

Der LIN-Bus [LIN06] besitzt eine maximale Datenrate von 20 kbit/s und wird meist mit 9,6 kbit/s oder 19,2 kbit/s betrieben. Eingesetzt wird der LIN-Bus überwiegend für eine sicherheitsunkritische Kommunikation im Komfortbereich. Ein LIN-Segment besteht aus einem Master sowie einem oder mehreren Slaves. Die Kommunikation erfolgt nach dem Master-Slave Prinzip. Der Master regelt den Buszugriff mit Hilfe einer oder mehrerer Schedule-Tabellen, die in einer Schleife durchlaufen werden. Dadurch ist der Medienzugriff kollisionsfrei und deterministisch.

In Abbildung 2.3 ist der Aufbau eines LIN-Frames dargestellt. Ein Frame besteht aus zwei Teilen, dem Header und der Response. Der Header wird stets vom Master ausgesendet, die Response entweder ebenfalls vom Master oder vom Slave. Das Break Field dient zur Signalisierung des Beginns eines Frames und besteht aus einem dominanten Pegel, der mindestens der 13-fachen Dauer eines Bit entspricht, und einem Break Delimiter. Das Sync Field dient der Synchronisierung, da meist nur der LIN-Master einen Taktgeber mit hoher Genauigkeit beinhaltet. Nach dem Sync Field folgt der Protected Identifier (PID), welcher aus dem Frame Identifier sowie einer Prüfsumme besteht. Die LIN-Response enthält bis zu 8 Byte Nutzdaten und beinhaltet ebenfalls eine Prüfsumme.

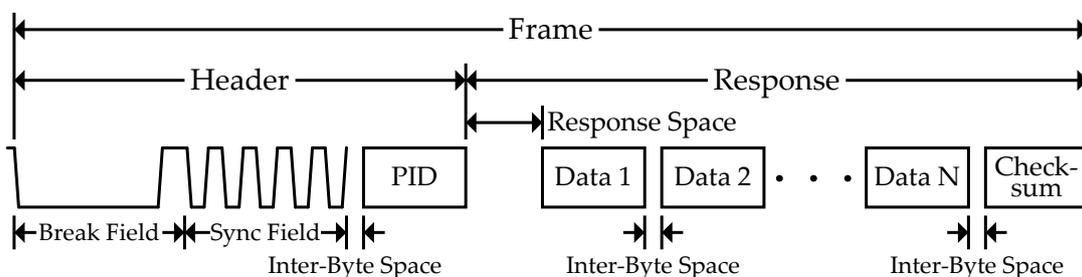


Abbildung 2.3: Aufbau eines LIN-Frames

Für die Kommunikation definiert die LIN-Spezifikation die Master-Task sowie die Slave-Task. Jeder Knoten besitzt eine Slave-Task, der Master zusätzlich auch die Master-Task. Für die Schedule-Tabelle wird ein Zeitraster verwendet, welches auch als Time Base bezeichnet wird. Die Sendezeitpunkte der Header sind immer Vielfache dieser Time Base, die meist 5 ms oder 10 ms beträgt.

Weiterhin definiert die Spezifikation vier Botschaften-Typen. Für die Übertragung von Nutzdaten kommt üblicherweise der Unconditional Frame zum Einsatz. Er ist an keine Bedingung gebunden und entspricht daher dem Standard Frame. Ein Unconditional Frame besteht aus Header und Response. Da der Master den Header aussendet

und die Response von genau einer Slave-Task ausgelöst wird, kann es bei dieser Kommunikation nicht zu Kollisionen kommen. Ein Event Triggered Frame wird für ereignisbasierte Nachrichten verwendet und entspricht weitgehend dem Unconditional Frame. Allerdings können mehrere Slaves eine Response auf den vom Master gesendeten Header aussenden. Damit der Absender einer Response identifiziert werden kann, sendet dieser im ersten Daten-Byte eine zusätzliche ID. Da Kollisionen bei diesem Zugriff nicht ausgeschlossen werden können, besitzt der Master eine zusätzliche Schedule-Tabelle zur Kollisionsauflösung, die nach einer Kollision aktiviert wird. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Schedule-Tabelle werden die Slaves nach einer Kollision einzeln abgefragt. Nach der Kollisionsbehandlung wird zum ursprünglichen Schedule zurückgekehrt. Über Sporadic Frames kann der Master selten auftretende Informationen aussenden. Ein Sporadic Frame entspricht einem vom Master ausgesendeten Unconditional Frame, der sich den Sendezeitpunkt mit anderen Sporadic Frames teilt. Sind mehrere Sporadic Frames gleichzeitig vorhanden, kommt es nicht zu einer Kollision, da der Master diese intern auflöst. Weiterhin definiert die Spezifikation zwei Diagnostic Frames. Bei einem Master Request Frame wird die Response vom Master ausgesendet, bei einem Slave Response Frame wird diese vom Slave versandt.

2.2.3 FlexRay

Mit zunehmender Anzahl an Sicherheits- und Assistenzsystemen im Fahrzeug, die eine Kopplung der Steuergeräte mit hohen Anforderungen an die Kommunikation erfordert, wurde die Entwicklung eines neuen Kommunikationssystems vorangetrieben. FlexRay [Fle10] wurde von einer Vielzahl an Automobilherstellern und Hardwareherstellern entwickelt, um Signale aufgrund von zeitkritischen Regelungen nicht nur mit minimalen Verzögerungen, sondern auch höchst deterministisch zu übertragen. Weiterhin unterstützt der Standard einen zweiten Übertragungskanal, der entweder für eine redundante Aussendung der Daten oder zur Verdoppelung der Datenrate verwendet werden kann. Die maximale Datenrate je Kanal liegt bei 10 Mbit/s. FlexRay kann in Bus- oder Sterntopologie oder auch als Kombination beider Typen verwendet werden.

Der FlexRay Standard definiert einen Kommunikationszyklus, der den Buszugriff exakt vorgibt. Der Datenkommunikation liegt eine Multi-Master-Kommunikationsstruktur zugrunde. Die einzelnen Teilnehmer dürfen jedoch nicht wie auf dem CAN-Bus jederzeit auf den Bus zugreifen. Die FlexRay-Teilnehmer müssen sich vielmehr an den exakt definierten Kommunikationszyklus halten. Im Kommunikationszyklus ist jeder FlexRay-Botschaft ein dedizierter Zeitschlitz (engl. „Slot“) zugeordnet, wodurch die Sendezeitpunkte der einzelnen Botschaften fest vorgegeben sind. Voraussetzung für diesen Buszugriff ist der Gleichlauf der lokalen Uhren in den FlexRay-Knoten. Dieser wird durch eine verteilte, fehlertolerante Uhrensynchronisation sichergestellt. Ein Vorteil dieser zeitgesteuerten Kommunikation ist, dass alle Knoten eines FlexRay Clusters unabhängig voneinander entwickelt und getestet werden können.

Jeder Kommunikationszyklus besitzt eine feste Dauer und besteht aus zwei Segmenten - einem statischen sowie einem dynamischen Segment. Abbildung 2.4 zeigt die Struktur eines FlexRay Kommunikationszyklus. Das statische Segment stellt den deterministischen Abschnitt des Kommunikationszyklus dar, mit dem die Übertragung wichtiger Botschaften sichergestellt wird. Ein Kommunikationszyklus beginnt immer mit einem statischen Segment, das in maximal 1023 Slots unterteilt ist. Der Medienzugriff im statischen Segment erfolgt mittels Time Division Multiple Access (TDMA). Durch die dedizierte Zuteilung von FlexRay-Botschaften zu Slots können echtzeitkritische Daten im statischen Segment isochron übertragen werden. Auf das statische Segment kann optional ein dynamisches Segment folgen. Zur Organisation des dynamischen Segments ist dieses in Minislots unterteilt, denen FlexRay-Botschaften zugeordnet sind. Das Verfahren ist vergleichbar mit einem TDMA-System. Allerdings sind die Minislots deutlich kürzer als die eigentlichen FlexRay-Botschaften. Dynamische FlexRay-Botschaften werden nur bei Bedarf übertragen. Beginnt eine Station eine Übertragung einer Botschaft in einem Minislot, verlängert sich die Dauer des Slots durch die Übertragung. Der Beginn der folgenden Minislots verschiebt sich dadurch nach hinten. Durch die Zuordnung einer FlexRay-Botschaft zu einem Minislot ist daher die Priorität der Botschaft implizit bestimmt. Mit steigender ID des Minislots sinkt die Priorität einer Botschaft. Da ein dynamisches Segment zeitlich begrenzt ist, verringert sich auch die Übertragungswahrscheinlichkeit mit abnehmender Priorität. Das dynamische Segment eignet sich für die Übertragung von ereignisbasierten Botschaften, wogegen das statische Segment für die Übertragung periodischer Statusinformationen sowie Botschaften mit strikten Anforderungen an die maximale Verzögerung verwendet wird.

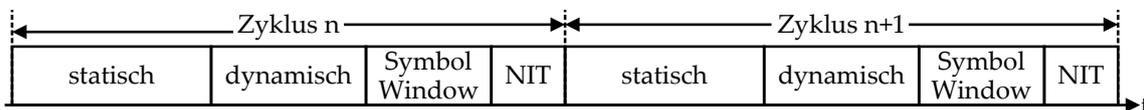


Abbildung 2.4: FlexRay Kommunikationszyklus

Das ebenfalls optionale Symbol Window wird verwendet, um bestimmte Symbole auszusenden, die beispielsweise den Start des ersten Kommunikationszyklus anzeigen. Die Network Idle Time (NIT) wird zur Uhrensynchronisation verwendet und ist daher in jedem Kommunikationszyklus zwingend vorhanden. Eine FlexRay-Botschaft besteht aus Header, Payload und Trailer. Zur Sicherung der Datenübertragung werden CRC-Prüfsummen verwendet. Ein 11 Bit langer Header-CRC schützt Teile des Headers, während der Trailer eine 24 Bit lange CRC-Prüfsumme der Payload enthält.

2.2.4 Media Oriented System Transport

Der MOST-Bus [MOS10] wurde zur Übertragung von Audio- und Videosignalen entwickelt. MOST ermöglicht die Übertragung von kontinuierlichen Bitströmen ohne

einen zusätzlichen Protokoll-Overhead. Ein ausgewähltes MOST-Gerät übernimmt die Funktion des Timing Masters, der die MOST-Frames mit einer festen Frequenz von 44,1 kHz oder 48 kHz in das Übertragungsmedium einspeist. Ein MOST-System kann mit 25 Mbit/s, 50 Mbit/s oder 150 Mbit/s (MOST25, MOST50 oder MOST150) betrieben werden. Je nach Datenrate stellt ein MOST-Frame eine bestimmte Anzahl an Streaming Channels zur Verfügung. Im Rahmen eines Verbindungsaufbaus fordert der Connection Master eine Datenquelle auf, sich die benötigte Anzahl an Streaming Channels beim Timing Master zu reservieren. Zur Organisation verwaltet der Timing Master dazu eine Channel Resource Allocation Table.

Weiterhin ermöglicht die MOST-Spezifikation die Übertragung von Datenpaketen. Dazu kann die Anzahl der Streaming Channels mit Hilfe eines Boundary Descriptors begrenzt werden. Dadurch werden die nicht verwendeten Streaming Channels zu einem Packet Channel zusammengefasst. Für den Zugriff auf den Packet Channel zirkuliert ein Token auf dem MOST-Ring. Nur der MOST-Knoten, der den Token vom Ring nimmt, darf auf den Packet Channel zugreifen. Dadurch ist der Zugriff kollisionsfrei. Zur Verwaltung und Steuerung des MOST-Systems werden Control Messages verwendet, die im Control Channel übertragen werden. Der Medienzugriff auf den Control Channel erfolgt mittels Carrier Sense Multiple Access (CSMA).

2.2.5 Ethernet

Der Einsatz von Ethernet (IEEE 802.3 [IEE12b]) im Fahrzeug ist ein wichtiges Thema in Forschungsarbeiten der vergangenen Jahre. Die Verwendung von Ethernet stellt eine Abwendung von der bisherigen Entwicklung in der Fahrzeugkommunikation dar. Mit Ethernet werden erstmals nicht neue proprietäre Technologien speziell für den Einsatz in Fahrzeugdomänen entwickelt. Stattdessen erfolgt die Verwendung von Standardkomponenten. Ethernet kann heutige Kommunikationstechnologien im Fahrzeug ersetzen und somit zur Homogenisierung aktueller Bordnetze beitragen. Obwohl Ethernet bereits Datenraten von 1 Gbit/s oder 10 Gbit/s unterstützt, wird im Fahrzeugumfeld meist mit maximal 100 Mbit/s übertragen. Da üblicherweise Switched Ethernet zum Einsatz kommt, ist die maximale Datenrate von 100 Mbit/s jedoch im Vergleich zu bestehenden Bussystemen anders zu bewerten. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Technologien, bei denen sich alle Teilnehmer in einem Netz die maximal zur Verfügung stehende Datenrate teilen, steht bei Switched Ethernet jedem Teilnehmer die volle Datenrate von 100 Mbit/s zur Verfügung. Begrenzender Faktor ist hier der Downlink zu den einzelnen Teilnehmern, der ebenfalls auf 100 Mbit/s limitiert ist.

In dem Buch „*Der neue BMW 7er: Entwicklung und Technik*“ [BMW09] aus dem Jahre 2009 wird erläutert, dass in einem 7er BMW erstmals Ethernet zur Vernetzung der Headunit mit dem Entertainment-System im Fond eingesetzt wurde. In [Bel14] wird beschrieben, dass besonders die Entwicklung des IEEE Audio Video Bridging (AVB)

[IEE11] der Audio/Video Bridging Task Group den Einsatz von Ethernet im Fahrzeug vorantreibt. Der AVB Standard erlaubt die Reservierung verschiedener Ressourcen wie beispielsweise Warteschlangen in Switches, wodurch eine gewisse Dienstgüte (Quality of Service, QoS) bereitgestellt werden kann. Durch Vorteile wie einer garantierten maximalen Verzögerung für Audio- und Videoverkehr, Skalierbarkeit oder geringeren Kosten wird vermutet, dass AVB in absehbarer Zeit Technologien wie MOST verdrängt. Für die Übertragung von Videobildern werden häufig analoge LVDS-Leitungen (Low Voltage Differential Signaling) verwendet, die aufgrund der nötigen Abschirmung dick, schwer und somit teuer sind. Auch diese analoge Videoübertragung kann durch AVB abgelöst werden.

Für die physikalische Übertragung werden im Fahrzeug nicht die sonst üblichen Ethernet-Kabel verwendet. Diese sind aufgrund der Schirmung teuer und nehmen wertvollen Bauraum ein. Durch den BroadR-Reach Automotive PHY [Bro14] wird eine bidirektionale Kommunikation über eine ungeschirmte Zweidrahtleitung ermöglicht. Außerdem adressiert diese Lösung die in der Automobilindustrie strengen Anforderungen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Mit diesen Voraussetzungen ist Ethernet eine geeignete Technologie für die zukünftige Vernetzung im Fahrzeug.

2.3 Zukünftige Bordnetze

In heutige Fahrzeuge wird eine zunehmende Anzahl an Funktionen integriert, wodurch mit einem steigenden Kommunikationsbedarf und einer anwachsenden Anzahl an Steuergeräten zu rechnen ist. Beispielsweise durch hochautomatisiertes Fahren (HAF) [RAAK12] steigt der Kommunikationsbedarf deutlich an, da die Informationen einer Vielzahl an Sensoren wie Radar, Laserscanner, Ultraschall sowie von Kamerabildern für die zuverlässige Erfassung des Fahrzeugumfelds nötig sind. Weiterhin sind Informationen zum Verkehrsfluss oder zu Baustellen auf der Strecke nötig, die mit anderen Fahrzeugen ausgetauscht oder aus dem Backend z.B. über eine Mobilfunkverbindung abgerufen werden können.

In vielen Bereichen ist zudem zu beobachten, dass die Entwicklungszyklen immer kürzer werden und somit vermehrt Anpassungen an bestehenden Bordnetzen nötig sind. Zukünftige Bordnetze müssen daher zum einen skalierbar sein, um die Zunahme an Funktionen und Steuergeräten zu beherrschen, zum anderen ist eine Erhöhung der Flexibilität nötig, um die Kosten sowie die Komplexität zu reduzieren. In der vorliegenden Arbeit wird schwerpunktmäßig der Einsatz der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug behandelt. Im nächsten Kapitel wird zusätzlich die Möglichkeit der Flexibilisierung des Kabelbaums durch die Verwendung der Funkkommunikation diskutiert. Jedoch zeigt sich, dass lediglich eine geringe Anzahl an sicherheitskritischen Funktionen drahtlos realisiert werden kann.

2.3.1 Herausforderungen

Zur Planung zukünftiger Bordnetz-Architekturen ist es zunächst nötig, die Herausforderungen aktueller Bordnetze zu identifizieren sowie die Anforderungen an zukünftige Architekturen zu prognostizieren. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Punkte aufgeführt, die es im Hinblick auf zukünftige Bordnetze anzugehen gilt.

Über die Jahre sind Fahrzeug-Bordnetze durch eine hohe Anzahl an Komponenten wie Steuergeräte, Aktuatoren und Sensoren sowie deren starke Vernetzung untereinander zu einem hoch komplexen System angewachsen. Der Kabelbaum eines Oberklasse-Fahrzeugs stellt meist die teuerste und schwerste Komponente des Bordnetzes dar.

Die Reduzierung der **Kosten** ist bei der Entwicklung von Bordnetzen stets das übergeordnete Ziel. Diese Kosten setzen sich aus verschiedenen Posten zusammen. Zunächst entstehen Kosten durch die Planung eines Bordnetzes. Je höher der Umfang und somit die Komplexität des betrachteten Systems ist, desto größer ist der nötige Arbeits- und Planungsaufwand. Die **Heterogenität** heutiger Bordnetze durch die unterschiedlichen Technologien trägt wesentlich zur Komplexität bei. Zwar können Teilsysteme theoretisch weitgehend getrennt voneinander entwickelt und getestet werden, jedoch schwindet dieser Vorteil rasch mit zunehmender Vernetzung über die Grenzen der einzelnen Teilsysteme hinweg. Durch die unterschiedlichen Technologien sind Gateways nötig, um die benötigte Kommunikation zwischen den Teilsystemen zu ermöglichen. Daher sind Gateways in Abhängigkeit vieler Teilsysteme zu entwickeln. Weiterhin muss in Gateways zum einen eine Filterung von Botschaften erfolgen, da nicht alle Botschaften auf allen Teilsystemen übertragen werden können, zum anderen ist eine Protokollumsetzung zwischen unterschiedlichen Systemen nötig.

Eine weitere Herausforderung stellt die **Variantevielfalt** dar. Durch die vielen Sonderausstattungen hat der Käufer eines Fahrzeugs eine hohe Anzahl an Konfigurationsmöglichkeiten. Nur in den seltensten Fällen kann für zwei oder mehrere mögliche Kombinationen von Sonderausstattungen derselbe Kabelbaum verwendet werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass für die meisten Kombinationen ein kundenspezifischer Kabelbaum gefertigt wird. Die **Flexibilität** eines einzelnen Kabelbaums ist gering, da dieser nur für die gewählte Kombination an Sonderausstattungen verwendet werden kann. Es ist auch nicht wirtschaftlich, einen Kabelbaum zu entwickeln, der für den Großteil der Fahrzeuge verwendet werden kann. Bei den meisten Fahrzeugkonfigurationen wären viele Leitungen ungenutzt. Das bedeutet, dass der Kabelbaum in diesen Fällen teurer als nötig wäre. Die Fertigung spezieller Kabelbäume für die jeweilige Konfiguration ist jedoch ebenfalls aufwendig, da bei der Montage sicherzustellen ist, dass zu jedem Fahrzeug der passende Kabelbaum vorhanden ist. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand bei der Fertigung des Fahrzeugs, was sich ebenfalls durch erhöhte Kosten bemerkbar macht.

Durch die Wartung und Diagnose entstehen ebenfalls Kosten, da der Aufwand bei der Fehlersuche in komplexen Systemen rasch ansteigt. Weiterhin fallen Kosten für

die einzelnen Leitungen des Kabelbaums an. Da der Kupferpreis oftmals schwankt, sind die Kosten des Kabelbaums nur schwer vorherzusagen. Durch die Einsparung von Leitungen können die Kosten daher auf vielen Ebenen gesenkt werden.

Der **Energieverbrauch** stellt eine weitere Herausforderung dar. Mit zunehmender Anzahl an Steuergeräten und Funktionen steigt zunächst auch der Gesamtenergiebedarf. Das Gewicht und die Größe der Energiespeicher (Kraftstofftank oder Batterien) sollten durch den gesteigerten Energiebedarf jedoch nicht erhöht werden. Um die Reichweite der Fahrzeuge zu maximieren und die CO₂-Emission zu minimieren, sollte der Energieverbrauch auf ein Minimum reduziert werden.

2.3.2 Powerline-Kommunikation im Fahrzeug

Eine vielversprechende Technologie zur Adressierung der Herausforderungen stellt die Powerline-Kommunikation dar. Durch deren Einsatz im Fahrzeug kann die Anzahl an Leitungen im Bordnetz deutlich reduziert und die Flexibilität erhöht werden, da für die Kommunikation lediglich die Anbindung an die ohnehin benötigte Stromversorgung nötig ist. Zur Reduzierung der Kosten werden in der vorliegenden Arbeit bestehende PLC-Standards auf die Eignung für den Einsatz im Fahrzeug geprüft. Ziel ist die Verwendung von Standardkomponenten mit geringen Modifikationen für den Einsatz im Fahrzeug. In Kapitel 4 werden PLC-Standards präsentiert, die für die Vernetzung im Heim- und Bürobereich bereits weit verbreitet sind und daher prinzipiell für die Kommunikation im Fahrzeug in Frage kommen. Der Energieverbrauch eines PLC-Systems im Fahrzeug sowie Möglichkeiten diesen zu verringern werden in Kapitel 6 behandelt.

In Abschnitt 2.5 werden die Kommunikationsanforderungen in Fahrzeugen betrachtet. Die Kommunikation auf den LIN-Bussen wird im Detail behandelt, da sich besonders der Ersatz der bestehenden LIN-Infrastruktur für eine erste Realisierung eines PLC-Systems eignet. Daher erfolgt eine Analyse bestehender LIN-Busse, um den tatsächlichen Kommunikationsbedarf zu ermitteln.

2.4 Vergleich der Technologien

Zur Einordnung ist in Tabelle 2.2 eine Bewertung der unterschiedlichen Technologien im Hinblick auf verschiedene Kriterien gegeben. Die Bewertung der Funktechnologien hängt stark vom verwendeten System sowie Frequenzband ab und dient an dieser Stelle lediglich zur groben Einordnung. Ist eine Technologie positiv bewertet (durch „+“ oder „++“ gekennzeichnet), weist diese wünschenswerte Eigenschaften bezüglich des Kriteriums auf.

Für die klassischen Bussysteme sowie für Ethernet werden dedizierte Leitungen für die Kommunikation benötigt, was sich negativ auf das Gewicht auswirkt. Werden

Tabelle 2.2: Bewertung der Vernetzungstechnologien (positiv = wünschenswert)

Kriterium	CAN	LIN	FlexRay	MOST	Ethernet	Funk	PLC
Datenrate	0	-	+	++	++	+	+
Gewicht	-	0	-	-	-	+	++
Systemkosten	0	+	-	-	0	-/0	-/0
Deterministische Übertragung	0	+	++	+	+	-	-/0/+
Flexibilität	-	-	-	-	0	++	++
Robustheit	+	+	++	+	+	-	0/+
Planungsaufwand	-	0	-	-	+	-	+

Funktechnologien eingesetzt, entfallen diese Kommunikationsleitungen. Jedoch müssen Antennen im Fahrzeug platziert werden. In den geschätzten Systemkosten sind sowohl die Kosten für die Transceiver als auch die der Verkabelung berücksichtigt. Da die LIN-Busse über Eindrahtleitungen kommunizieren, sind die Kosten für die Verkabelung geringer als beim CAN-Bus. PLC benötigt nur die ohnehin vorhandenen Leitungen zur Energieversorgung. Allerdings steht heute noch nicht endgültig fest, wie hoch die Kosten für die Transceiver ausfallen.

Als Determinismus wird hier die Eigenschaft bezeichnet, garantierte Sendezeitpunkte zur Verfügung zu stellen. Diese werden beispielsweise für echtzeitkritische Regelungen benötigt. Auf dem CAN-Bus erfolgt zwar eine Priorisierung, allerdings können keine garantierten Sendezeitpunkte sichergestellt werden. Auf dem LIN-Bus sind Sendezeitpunkte durch die Schedule-Tabellen vorgegeben, jedoch sind Abweichungen durch Wechsel der Schedule-Tabellen und durch die niedrige Genauigkeit der Taktgeber möglich. FlexRay wurde besonders für sicherheitskritische Regelungen entwickelt und stellt Sendezeitpunkte mit hoher Genauigkeit bereit. Für die Funkkommunikation existieren zwar Protokolle mit deterministischen Sendezeitpunkten, jedoch können Störungen nicht ausgeschlossen werden. Mit PLC werden je nach Protokoll deterministische Sendezeitpunkte bereitgestellt. Dieser Punkt wird im Laufe der Arbeit noch genauer betrachtet.

Mit der Flexibilität wird bewertet, wie hoch der Aufwand ist, Teilnehmer an das Kommunikationssystem anzubinden. Bei den klassischen Bussystemen muss ein Gerät immer direkt mit dem entsprechenden Bussegment verbunden werden. Wird Ethernet verwendet, kann eine Verbindung zum nächstgelegenen Switch ausreichen. Bei Funk oder PLC wird lediglich eine Anbindung an die Stromversorgung benötigt. Eine Konnektivität zu dedizierten Kommunikationsleitungen ist nicht erforderlich.

Durch die Robustheit wird die Fehler- bzw. Störanfälligkeit bewertet, die beispielsweise bei der Funkkommunikation hoch und deren Robustheit damit niedrig ist. FlexRay dagegen weist eine hohe Robustheit durch den zweiten möglichen Kanal auf. Die Fehleranfälligkeit eines PLC-Systems hängt stark von der Realisierung ab und kann an dieser Stelle nicht endgültig bewertet werden.

Der Planungsaufwand berücksichtigt zum einen den Aufwand für den Verbau der Systeme im Fahrzeug, zum anderen den für die Zuteilung der Ressourcen nötigen Aufwand. Für CAN, LIN, FlexRay und MOST ist jeweils eine direkte Anbindung an die entsprechenden Bus-Leitungen nötig. Werden bei MOST Polymerfasern statt Kupferleitungen verwendet, dürfen vorgegebene Biegeradien nicht unterschritten werden. Durch das Master-Slave Kommunikationsprotokoll des LIN-Busses ist der Aufwand für die Ressourcenzuteilung geringer als bei CAN, FlexRay und MOST. Bei FlexRay muss die Zuteilung der Slots so gewählt werden, dass aktuelle sowie zukünftige Kommunikationsanforderungen erfüllt werden können. Bei CAN sind die Prioritäten derart zu vergeben, dass Botschaften auch im Worst Case rechtzeitig übertragen werden. Wird Ethernet oder PLC verwendet, ist lediglich die Anbindung an einen nahegelegenen Switch bzw. an die Stromversorgung nötig. Durch die Verwendung von Knotenadressen bei Ethernet können Knoten direkt miteinander kommunizieren, wodurch spätere Erweiterungen mit geringem Aufwand realisiert werden können. Da PLC über die Stromleitungen kommuniziert, entsteht kein zusätzlicher Aufwand für die Planung der Datenleitungen. Beim Einsatz von Funktechnologien sind Frequenzen derart zu wählen, dass Störungen minimiert werden. Weiterhin muss mit einer böswilligen Störung gerechnet werden, wodurch sich der Aufwand für die Planung der über die Funkkommunikation realisierten Funktionen deutlich erhöht.

2.5 Kommunikationsanforderungen

In den Anfängen der Kommunikation im Fahrzeug war der Großteil der Kommunikationsbeziehungen eine 1:1 Beziehung. Dies bedeutet, dass zwei Komponenten ohne Beteiligung weiterer Komponenten direkt Informationen miteinander austauschen. Mit zunehmender Vernetzung im Fahrzeug nimmt die Anzahl an 1:x Kommunikationsbeziehungen zu, da die Informationen, die eine Komponente aussendet, für eine steigende Anzahl an Empfängern von Relevanz sind. Diese Art der Kommunikation wird auch als Multicast (Verteilung der Nachricht an mehrere Teilnehmer) bzw. Broadcast (Verteilung an alle Teilnehmer) bezeichnet. Eine Analyse der Kommunikationsbeziehungen basierend auf einem Auszug aus einer Bordnetzdatenbank für CAN-Busse ist in der Dissertation von Kay Weckemann [Wec14] zu finden. Als Ergebnis zeigt sich, dass aktuell etwa die Hälfte der Botschaften an genau einen Empfänger gerichtet sind. Als Maximum werden 40 Empfänger genannt, was basierend auf dem untersuchten Datensatz allen Teilnehmern auf dem entsprechenden Bussegment entspricht.

Der Großteil der heute im Fahrzeug verwendeten Kommunikationstechnologien basiert auf einem geteilten Medium, auf dem die Teilnehmer alle ausgesendeten Botschaften jederzeit mitlesen können. Diese Art der Kommunikation hat auch Auswirkungen auf das verwendete Adressierungsschema. Statt Sender und Empfänger durch Adressen eindeutig zu identifizieren, wird im Fahrzeug weitgehend eine Nachrichtenadressierung verwendet. Durch die Adresse oder ID einer Nachricht ist in der

Regel eindeutig definiert, welche Information in der Botschaft enthalten ist. Der Vorteil dieser Art der Kommunikation ist, dass bei hinzukommenden Teilnehmern keine Neukonfiguration des Absenders einer Botschaft nötig ist. Lediglich der neu hinzugekommene Empfänger muss so konfiguriert werden, dass die für den Knoten relevanten Botschaften dekodiert und an die darüber liegenden Schichten weitergegeben werden. Dieser Broadcast funktioniert jedoch zunächst nur auf einzelnen Kommunikationssegmenten. Durch die Gateways können Informationen auch auf anderen Segmenten verteilt werden. Ein Beispiel für derartige Broadcast-Botschaften ist der aktuelle Fahrzeugzustand (beispielsweise *parkend*, *Zündung an* oder *Motor an*), der für eine hohe Anzahl an Steuergeräten im Fahrzeug von Relevanz ist.

2.5.1 Use Case: Local Interconnect Network

Der LIN-Bus ist besonders stark im Bereich der Komfortfunktionen vertreten. Die Sicherheitsanforderungen in dieser Domäne sind für den Großteil der Funktionen gering. Auch die nötigen Datenraten zur Steuerung der Komfortfunktionen sind vergleichsweise niedrig. Aus diesen Gründen ist der kostengünstige LIN-Bus für die Vernetzung in dieser Domäne weit verbreitet. Im Komfortbereich finden jedoch auch meist die größten Änderungen von Fahrzeugderivat zu Fahrzeugderivat statt. Über die Jahre ist die Anzahl der LIN-Busse deutlich angestiegen. Zusätzlich kommen neue Funktionen wie eine ambiente Innenraumbeleuchtung hinzu, die zunehmend in Fahrzeugen der Oberklasse Einzug hält. Für diese Art der Innenraumbeleuchtung werden dreifarbige Leuchtdioden (RGB-LEDs) in weiten Bereichen des Innenraums verbaut. Für die Ansteuerung gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Controllern unterschiedlicher Hersteller. Neben der Ansteuerung für die LEDs enthalten viele dieser Lösungen einen LIN-Transceiver zur Kommunikation. Um weiche Farbübergänge bei einer Vielzahl von Lichtknoten zu erzeugen, ist zeitweise eine hohe Nachrichtenfrequenz nötig. Ein LIN-Bus kann dadurch schnell an die Auslastungsgrenze gebracht werden. Da die Lichtknoten über den gesamten Fahrzeuginnenraum verteilt sind, ist der Verkabelungsaufwand sehr hoch. Die Anzahl an LEDs für die ambiente Innenraumbeleuchtung ist heutzutage meist überschaubar. In wenigen Jahren kann die Anzahl an LEDs im Innenraum jedoch bereits mehrere hundert bis hin zu über tausend Stück betragen. Die Verkabelung mit Hilfe von LIN-Bussen stößt hier schnell an ihre Grenzen.

Die aktuelle LIN-Infrastruktur eignet sich als Use Case für eine erste Realisierung eines PLC-Systems im Fahrzeug. Die hohe Anzahl an Leitungen, die für die Vernetzung der LIN-Knoten benötigt wird, bietet ein großes Einsparungspotential. Die geringen Sicherheitsanforderungen der Funktionen, die aktuell über LIN-Busse kommunizieren, sind ein weiterer Grund für diese Wahl. Basierend auf den Erfahrungen mit der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug können in Zukunft auch weitere Funktionen migriert werden, die aktuell noch über andere Technologien kommunizieren.

2.5.2 Bestehende LIN-Infrastruktur

In heutigen Oberklasse-Fahrzeugen ist bereits eine hohe Anzahl an LIN-Bussen im Einsatz. Anhand eines Systemschaltplans einer Oberklasse-Limousine aus dem Jahr 2011 erfolgte eine beispielhafte Analyse der LIN-Infrastruktur. Es wurde das Fahrzeugmodell ausgewählt, welches zum Zeitpunkt der Analyse die höchste Anzahl an LIN-Bussen aufwies. In dem betrachteten Muster-Fahrzeug kommen bei voller Ausstattung maximal 27 LIN-Busse parallel zum Einsatz. 20 dieser LIN-Busse werden mit einer Datenrate von 19,2 kbit/s betrieben, die restlichen sieben mit einer Datenrate von 9,6 kbit/s. Laut Systemschaltplan liegt die maximale Anzahl an LIN-Knoten zwischen 90 und 100. Diese Zahl kann bei tatsächlicher Konfiguration des Fahrzeugs niedriger ausfallen, da sich einzelne Steuergeräte gegenseitig ausschließen können. In dem betrachteten Fahrzeug ist noch keine ambiante Innenraumbeleuchtung vorhanden. Durch diese steigt die Anzahl an LIN-Bussen mindestens um ein weiteres Bussegment an. [MSS09] beschreibt, dass durch die verwendeten Pull-Up-Widerstände die maximale Anzahl an LIN-Knoten in einem Cluster auf 16 begrenzt ist. Steigt die Anzahl an RGB-LEDs für die ambiante Innenraumbeleuchtung, ist auch mit einer steigenden Anzahl an LIN-Bussen für deren Vernetzung zu rechnen.

2.5.3 Kommunikationsanalyse

Die Ersetzung der bestehenden LIN-Infrastruktur durch ein Powerline-Kommunikationssystem erfordert die Kenntnis des aktuellen Verkehrsaufkommens auf den LIN-Bussen sowie eine Abschätzung für eine Erhöhung des Verkehrs in Zukunft. Die Kommunikation auf den LIN-Bussen basiert auf dem Polling der einzelnen Botschaften in Abhängigkeit der Schedule-Tabellen. Diese Schedule-Tabellen werden in einer Schleife durchlaufen, wodurch der Master permanent Header aussendet. Der tatsächliche Kommunikationsbedarf kann daher nicht aus den Schedule-Tabellen abgeleitet werden. Als Beispiel ist ein Schalter zu nennen, der zyklisch vom Master abgefragt wird, auch wenn sich dessen Zustand in der Zwischenzeit nicht ändert.

Zunächst wird die Länge der Nutzdaten untersucht. Dazu wurde auf jedem LIN-Bus diejenige Schedule-Tabelle identifiziert, die im Normalbetrieb durchlaufen wird. Konnte diese nicht anhand des Namens (z.B. „MAIN“) erkannt werden, wurde die Schedule-Tabelle ausgewählt, die die höchste Last auf dem Kanal erzeugt. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Über 61% der Botschaften weisen die maximale Nutzdatenlänge von 8 Byte auf. Weitere 20% entfallen auf Botschaften mit 2 Byte Nutzdaten. Die restlichen Botschaften weisen überwiegend Nutzdatenlängen von 4 oder 6 Byte auf. In den betrachteten Schedule-Tabellen sind keine Botschaften mit der minimalen Nutzdatenlänge von 1 Byte oder einer Länge von 7 Byte vorhanden. Es ist zu erwähnen, dass diese Verteilung keinen direkten Rückschluss auf den tatsächlichen Kommunikationsbedarf ermöglicht. Auch wenn überwiegend Botschaften mit 8 Byte Nutzdaten vom Master abgefragt werden, kann der Übertragungsbedarf kurzer Botschaften unter Umständen deutlich höher sein.

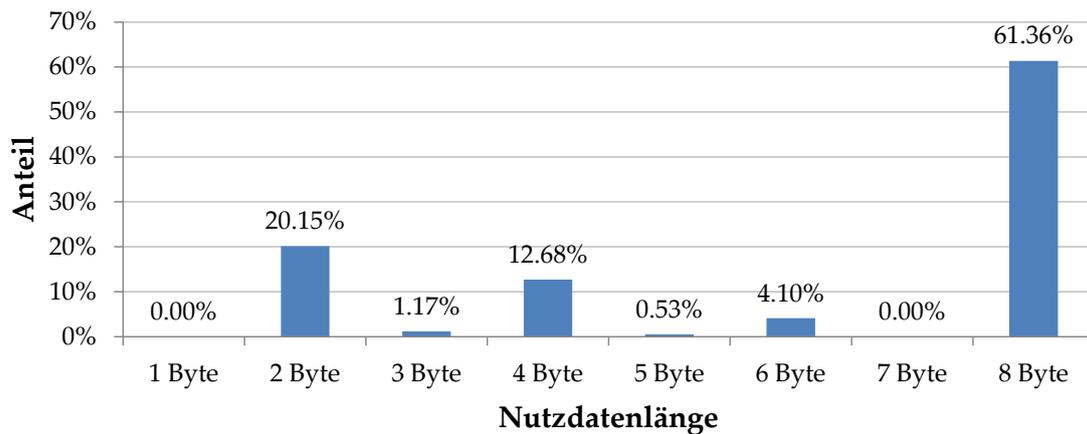


Abbildung 2.5: Verteilung der LIN-Nutzdatenlänge

Soll der tatsächliche Kommunikationsbedarf ermittelt werden, sind die jeweiligen Funktionen sowie die zugehörigen Botschaften zu identifizieren, die durch die Funktionen ausgelöst werden. Der Großteil der Kommunikation ist ereignisbasiert, wodurch auch die Häufigkeit des Nachrichtenaustauschs jeder Funktion abzuschätzen ist. Dieser hängt von einigen Einflussfaktoren ab. Die Anzahl der Insassen sowie deren Bedienerverhalten wirken sich stark auf die zu versendenden Botschaften aus. Zusätzlich kommen äußere Einflüsse wie die Umgebungstemperatur hinzu. Beispiele sind die Einstellung der Klimaautomatik, die je nach Außentemperatur häufiger oder weniger häufig angepasst wird, oder die Fensterheber, die im Winter üblicherweise selten bedient werden. Eine weitere Möglichkeit den Kommunikationsbedarf zu ermitteln, besteht in der Aufzeichnung der übertragenen Botschaften. Um aussagekräftige Werte zu erhalten, muss die Aufzeichnung allerdings über einen langen Zeitraum mit unterschiedlichen Insassen sowie variierenden Randbedingungen erfolgen. Aus diesen Gründen wird im Folgenden eine Worst-Case-Abschätzung des Kommunikationsbedarfs durchgeführt.

Es wird angenommen, dass alle LIN-Busse jeweils zu 10% durch die ereignisbasierte Kommunikation ausgelastet sind. Zusätzlich wird angenommen, dass der LIN-Header immer vom Master und die Response stets von LIN-Slaves ausgesendet wird. Der Master sendet also keine Response, wodurch für die Berechnung die maximale Dauer des Response Spaces (siehe Abbildung 2.3) zu berücksichtigen ist. Laut LIN-Spezifikation [LIN06] darf sowohl die Dauer des Headers als auch die der Response 140% der nominellen Übertragungsdauer betragen, was auch bei der Planung der Schedule-Tabellen berücksichtigt wird. Für die Berechnung wird die physikalische LIN-Datenrate daher zunächst um diese Reserve von 40% bereinigt. Die resultierende Datenrate der ereignisbasierten Kommunikation beträgt:

$$R_{event} = 10\% \cdot \frac{R_{LIN}}{140\%} \quad (2.1)$$

Daraus ergeben sich in Abhängigkeit der Datenrate R_{LIN} des aktuell betrachteten

LIN-Busses die in Tabelle 2.3 dargestellten Datenraten für die ereignisbasierte Kommunikation.

Tabelle 2.3: Ereignisbasierte Datenrate in Abhängigkeit der LIN-Datenrate

R_{LIN}	R_{event}
9,6 kbit/s	685,71 bit/s
19,2 kbit/s	1371,43 bit/s

Mit Hilfe der Datenrate R_{event} kann in Abhängigkeit der Nutzdatenlänge die mittlere Zykluszeit bestimmt werden:

$$\text{Zykluszeit(Payload)} = \frac{\text{Header} + \text{Response(Payload)}}{R_{event}} \quad (2.2)$$

In Tabelle 2.4 sind die berechneten Werte für die mittlere Zykluszeit in Abhängigkeit der Nutzdatenlänge sowie der LIN-Datenrate angegeben.

Tabelle 2.4: Mittlere Zykluszeit in Abhängigkeit der Nutzdatenlänge

Payload	Mittlere Zykluszeit [ms]	
	9,6 kbit/s	19,2 kbit/s
1 Byte	78,75	39,38
2 Byte	93,33	46,67
3 Byte	107,92	53,96
4 Byte	122,50	61,25
5 Byte	137,08	68,54
6 Byte	151,67	75,83
7 Byte	166,25	83,13
8 Byte	180,83	90,42

Basierend auf diesen Zykluszeiten einzelner LIN-Busse erfolgt die Berechnung für die Gesamtheit aller LIN-Busse im Fahrzeug. Für die Berechnung werden 20 LIN-Busse mit 19,2 kbit/s und sieben LIN-Busse mit 9,6 kbit/s berücksichtigt. Die mittleren Zykluszeiten für die gesamte LIN-Infrastruktur berechnen sich in Abhängigkeit der Nutzdatenlänge wie folgt:

$$\text{Zykluszeit(Payload)} = \left(\frac{20}{\text{Zykluszeit(Payload, 19,2 kbit/s)}} + \frac{7}{\text{Zykluszeit(Payload, 9,6 kbit/s)}} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

Aus den berechneten mittleren Zykluszeiten der gesamten LIN-Infrastruktur kann wiederum die Nutzdatenrate bestimmt werden:

$$\text{Nutzdatenrate(Payload)} = \frac{\text{Payload}}{\text{Zykluszeit(Payload)}} \quad (2.4)$$

In Tabelle 2.5 ist die Abschätzung der mittleren Zykluszeiten sowie die sich daraus ergebenden Nutzdatenraten des ereignisbasierten Verkehrs für die gesamte LIN-Infrastruktur dargestellt. Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, liegt die minimal verwendete Nutzdatenlänge in den Haupt-Schedule-Tabellen aktuell bei 2 Byte. Für den Worst Case wird daher angenommen, dass ausschließlich Botschaften mit 2 Byte Nutzdaten übertragen werden. Basierend auf den Werten aus Tabelle 2.5 wird eine Zykluszeit von 2 ms für den ereignisbasierten Verkehr im Worst Case gewählt.

Tabelle 2.5: Mittlere Zykluszeit und Nutzdatenrate aller 27 LIN-Busse

Payload	Mittlere Zykluszeit [ms]	Nutzdatenrate [kbit/s]
1 Byte	1,6755	4,7746
2 Byte	1,9858	8,0571
3 Byte	2,2961	10,4525
4 Byte	2,6064	12,2776
5 Byte	2,9167	13,7143
6 Byte	3,2270	14,8747
7 Byte	3,5372	15,8316
8 Byte	3,8475	16,6341

Worst-Case-Verkehrsabschätzung: Folgende Annahmen werden für die Worst-Case-Zusammensetzung des Verkehrs auf der heutigen LIN-Infrastruktur getroffen: Ereignisbasierter Verkehr trifft mit einer Zwischenankunftszeit von 2 ms ein (siehe Tabelle 2.5). Weiterhin existiert periodischer Verkehr mit einer Periodendauer von 10 ms, der für die zuvor erwähnten RGB-LEDs angenommen wird. 10 ms entsprechen der minimal möglichen Zykluszeit, die sich bei Verwendung der üblichen Time Base und maximaler Payload-Länge bei einer LIN-Datenrate von 19,2 kbit/s ergibt. Außerdem wird angenommen, dass zwei bis vier periodische Übertragungen jeweils mit einer Periode von 50 ms beispielsweise für die Einstellung der Außenspiegel oder bei Benutzung der Fensterheber auftreten. Mit diesen Werten ergibt sich eine Worst-Case-Abschätzung des Verkehrs auf der aktuellen LIN-Infrastruktur von 640-680 Frames pro Sekunde.

2.5.4 Datenrate und Framerate

In diesem Abschnitt wird der Begriff der Framerate für die Betrachtungen in dieser Arbeit definiert. Die reine Datenrate eines Kommunikationssystems ist nicht immer

aussagekräftig, da die Effizienz stark vom Protokoll-Overhead abhängt. Dieser fällt besonders stark bei kurzen Botschaften, wie sie im automobilen Umfeld überwiegend vorkommen, ins Gewicht. Aus diesem Grund wird im Folgenden betrachtet, wie viele Frames pro Sekunde über unterschiedliche Technologien übertragen werden können. Zunächst wird bestimmt, wie viele Frames maximal pro Sekunde über einen LIN-Bus übertragen werden können. Zum Vergleich werden im Anschluss Werte für den CAN-Bus sowie für Ethernet angegeben.

Local Interconnect Network

Die Sendezeitpunkte der Header in den Schedule-Tabellen des LIN-Masters sind als Vielfaches der Time Base angegeben, die üblicherweise 5 ms oder 10 ms beträgt. Zunächst wird die Übertragungsdauer der LIN-Frames in Abhängigkeit der Nutzdaten mit Hilfe von Gleichung 2.5 bestimmt. Die berechneten Werte sind in Tabelle 2.6 angegeben.

$$T_{Tx}(R_{LIN}, \text{Payload}) = \frac{140\% \cdot [T_{Header} + T_{Response}(\text{Payload})]}{R_{LIN}} \quad (2.5)$$

Tabelle 2.6: Übertragungsdauer von LIN-Frames

Payload	T _{Tx} [ms]	
	9,6 kbit/s	19,2 kbit/s
1 Byte	7,88	3,94
2 Byte	9,33	4,67
3 Byte	10,79	5,40
4 Byte	12,25	6,13
5 Byte	13,71	6,85
6 Byte	15,17	7,58
7 Byte	16,63	8,32
8 Byte	18,08	9,04

Mit der jeweiligen Übertragungsdauer der LIN-Frames aus Tabelle 2.6 und der Time Base lässt sich das kürzeste Intervall und die damit verbundene Datenrate in Frames pro Sekunde angeben. Das Ergebnis ist in Tabelle 2.7 für LIN-Busse mit 9,6 kbit/s und 19,2 kbit/s angegeben.

Tabelle 2.7: Minimales Intervall und maximale Datenrate auf dem LIN-Bus

Payload	Minimales Intervall		Datenrate [Frames/s]	
	9,6 kbit/s	19,2 kbit/s	9,6 kbit/s	19,2 kbit/s
1-2 Byte	10 ms	5 ms	100	200
3-5 Byte	15 ms	10 ms	66,67	100
6-8 Byte	20 ms		50	

Controller Area Network

Beim CAN-Bus ist das Bit-Stuffing zu berücksichtigen. Nach fünf Bit gleicher Polarität wird ein Bit mit invertierter Polarität eingefügt. Das Bit-Stuffing ist somit abhängig vom Inhalt der Nachricht. Für die Betrachtung in diesem Abschnitt wird der Best und Worst Case betrachtet. Ein CAN-Frame der Version 2.0A hat eine Länge von 47 Bit inklusive Interframe Space ohne Nutzdaten. Im Folgenden werden die Werte für den kürzesten (1 Byte Nutzdaten) und längsten (8 Byte Nutzdaten) CAN-Frame bestimmt. In Tabelle 2.8 ist die maximale Anzahl an Frames pro Sekunde ohne Bit-Stuffing angegeben.

Tabelle 2.8: CAN-Bus Datenrate ohne Bit-Stuffing

Payload	Datenrate [Frames/s]	
	100 kbit/s	500 kbit/s
1 Byte	1818,2	9090,9
8 Byte	900,9	4504,5

Im Worst Case wird davon ausgegangen, dass nach jedem fünften Bit ein Stopfbit eingefügt wird. In Tabelle 2.9 ist die maximale Anzahl an Frames pro Sekunde für den Worst Case angegeben.

Tabelle 2.9: CAN-Bus Datenrate mit Bit-Stuffing

Payload	Datenrate [Frames/s]	
	100 kbit/s	500 kbit/s
1 Byte	1515,2	7575,6
8 Byte	751,9	3759,4

Ethernet

Zuletzt wird die maximale Framerate für Ethernet angegeben. Ein Ethernet-Frame besteht aus 7 Byte Präambel, 1 Byte Start of Frame Delimiter, 6 Byte MAC Zieladresse, 6 Byte MAC Quelladresse, einem optionalen 4 Byte 802.1Q Tag, 2 Byte Ethertype bzw. Längensfeld, 42 Byte (bzw. ohne 802.1Q Tag 46 Byte) bis 1500 Byte Payload und einer 4 Byte Frame Check Sequence. Zusätzlich gibt es einen Interframe Gap von 12 Byte zwischen zwei Frames. Damit werden mindestens 84 Byte je Ethernet-Frame übertragen. Die resultierenden minimalen Zykluszeiten sowie die maximale Framerate ist in Tabelle 2.10 angegeben.

Tabelle 2.10: Maximale Ethernet-Framerate

PHY-Rate	Minimale Zykluszeit	Framerate [Frames/s]
10 Mbit/s	67,2 μ s	14.880
100 Mbit/s	6,72 μ s	148.809
1 Gbit/s	672 ns	1.488.095

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über Fahrzeugbordnetze und übliche Vernetzungstechnologien gegeben. Ein heutiges Bordnetz besteht aus einer Vielzahl an Komponenten. Für die Vernetzung der verteilten Systeme sind Kommunikationstechnologien nötig, die die jeweiligen Anforderungen der Funktionen erfüllen. Über die Jahre sind mehrere speziell entworfene Kommunikationstechnologien entstanden. Ausgehend von aktuellen Bordnetzen wurden die Herausforderungen herausgestellt, die es für zukünftige Bordnetze zu adressieren gilt. Die Powerline-Kommunikation ist eine vielversprechende Technologie, um die Komplexität aktueller Kabelbäume durch die Verringerung der Anzahl an Leitungen zu reduzieren. PLC erhöht die Flexibilität im Hinblick auf Veränderungen im Kabelbaum, da für die Kommunikation keine dedizierten Leitungen benötigt werden.

Weiterhin wurden aktuelle Kommunikationsanforderungen und im Speziellen die der LIN-Infrastruktur herausgestellt, da sich diese für eine erste Realisierung eines PLC-Systems eignet. Der tatsächliche Kommunikationsbedarf auf den LIN-Bussen lässt sich nicht anhand der Schedule-Tabellen erkennen, weswegen eine Worst-Case-Abschätzung des ereignisbasierten Verkehrs erfolgte. Zuletzt wurde der Begriff der Framerate im Fahrzeugkontext eingeführt, da Frames oftmals nur wenige Byte an Nutzdaten transportieren und daher die Kanaldatenrate nicht immer aussagekräftig ist. Durch die Betrachtung der Framerate kann ein Vergleich der Kommunikationstechnologien anhand der maximalen Rate erfolgen, mit der kurze Informationsblöcke versendet werden können. Beispielhaft wurden für LIN, CAN und Ethernet maximale Frameraten berechnet. Ein CAN-Bus mit 500 kbit/s kann unter Annahme des Worst-Case-Bit-Stuffings im Vergleich zu einem LIN-Bus mit 19,2 kbit/s bei einer Payload von 8 Byte mehr als die 37-fache Anzahl an Frames pro Sekunde übertragen. Ein 100 Mbit/s Ethernet-System kann bereits die 1488-fache Anzahl an Frames pro Sekunde transportieren. Weiterhin ist zu erwähnen, dass beim LIN-Bus durch die Schedule-Tabellen vorgegeben ist, welche Botschaften wann versendet werden. Bei CAN und Ethernet dagegen können jederzeit beliebige Informationen ausgesendet werden.

3 Funkkommunikation im Fahrzeug

Als Alternative zur drahtgebundenen Kommunikation wird in diesem Kapitel der Einsatz von Funktechnologien im Fahrzeug betrachtet. Die Flexibilität kann durch den Einsatz der Funkkommunikation deutlich erhöht werden, da das Verlegen von Kommunikationsleitungen entfällt. Allerdings muss die Bewertung basierend auf einer Vielzahl von Kriterien erfolgen. Die Komplexität des Kabelbaums kann durch Funktechnologien reduziert werden. Allerdings wirkt sich der Einsatz auf den Planungsaufwand aus, da eine sorgfältige Zuteilung der Ressourcen nötig ist. Weiterhin sind Antennen im Fahrzeug an geeigneten Verbauorten zu platzieren. Durch die nötigen Antennen reduziert sich der Vorteil, der durch die Einsparung von Leitungen entsteht.

Generell eignet sich die Funkkommunikation besonders für Bereiche, in denen die Kabelführung eine große Herausforderung darstellt. Beispiele sind Pfade in die Türen oder die Heckklappe, an denen die Leitungen einer erhöhten mechanischen Belastung ausgesetzt sind. Durch das Öffnen und Schließen der Türen werden die Kabel geknickt, bei der Heckklappe tritt oftmals zusätzlich eine Torsion auf. Durch diese Belastungen können mit zunehmendem Alter des Fahrzeugs Kabelbrüche auftreten.

Der Fokus in diesem Kapitel liegt auf Funksystemen, die im lizenzfreien 2,4 GHz ISM-Band arbeiten. Der Großteil der Ergebnisse und Aussagen lässt sich jedoch auch auf andere Frequenzbereiche übertragen.

3.1 Nutzung der ISM-Bänder

Für die Nutzung von Funktechnologien ist die Auswahl eines geeigneten Frequenzbandes nötig. Um Störungen bei der Kommunikation über die Luftschnittstelle zu minimieren gibt es Regulierungsbehörden, die für verschiedene Anwendungsbereiche jeweils Teile des Spektrums freigeben. Für einige Bereiche des Spektrums fallen Lizenzgebühren an, wogegen andere Teile auch lizenzfrei genutzt werden können. Die ISM-Bänder (Industrial, Scientific and Medical) sind Frequenzbereiche, die für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen lizenzfrei sowie ohne spezielle Genehmigung genutzt werden dürfen. Zu den bekannten Frequenzbereichen der ISM-Bänder gehört das 433 MHz Band oder die 2,4 GHz und 5 GHz Bänder, in denen auch WLAN operiert. Eine Herausforderung stellt die Vereinheitlichung der Frequenzbänder über Ländergrenzen hinweg dar. Der Großteil der ISM-Bänder kann weltweit genutzt werden. Dies ist besonders bei Geräten wichtig, die weltweit vermarktet werden, da andernfalls angepasste Varianten je nach Region nötig sind. Auch

für Fahrzeuge muss sichergestellt sein, dass diese beim Verkauf oder bei der Überführung in ein anderes Land nicht gegen dort geltende Vorschriften verstoßen.

Aufgrund der Interferenzen durch andere Teilnehmer im selben Frequenzband ist die Nutzung eines dedizierten Frequenzbandes wünschenswert. Hohe Lizenzkosten sowie die weltweit einheitliche Vergabe eines Frequenzbandes stellen jedoch eine Herausforderung dar. In diesem Kapitel wird daher die Nutzung von Funktechnologien betrachtet, die in den ISM-Bändern arbeiten. Weiterhin können Kosten durch die Nutzung von Standardkomponenten reduziert werden. Durch die starke Verbreitung von CE-Geräten (Consumer Electronics) mit integrierten Funkkommunikationsadaptern ist bereits heute eine Vielzahl an Technologien im Fahrzeug vertreten. Beispielsweise wird Bluetooth verwendet, um Smartphones mit dem Fahrzeug zu verbinden, um darüber zu telefonieren oder Musik an das Fahrzeug zu streamen. Über WLAN können Videos an das Entertainmentsystem übertragen werden oder es wird den Fahrgästen ein Internetzugang über ein in das Fahrzeug integriertes Mobilfunk-Modem mit WLAN Access Point bereitgestellt. Für die Anbindung von drahtlosen Kopfhörern an das Entertainmentsystem kann ebenfalls Bluetooth oder eine alternative Technologie wie Klear [Kle07] zum Einsatz kommen. Zusätzlich zu den Systemen, die bereits im Fahrzeug verbaut sind, kommen Geräte, die durch Insassen im Fahrzeug verwendet werden. Als Beispiele sind erneut Bluetooth und WLAN zu nennen, die für Funktionen wie Audiostreaming, Telefonie oder Tethering verwendet werden können.

Funktechnologien, die im selben Frequenzband arbeiten, müssen mit dieser Interferenz auf geeignete Weise umgehen. Ziel des Backoff-Mechanismus des WLAN Medienzugriffs ist, die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Zugriffs auf den Kanal zu reduzieren. Bluetooth dagegen kann Interferenzen auf Teilen des Frequenzbandes erkennen und diese Subbänder im Anschluss meiden. Dies gelingt allerdings nur, wenn ausreichend Frequenzspektrum zur Verfügung steht, welches geringe oder keine Interferenzen aufweist.

Auch in Bezug auf die maximale Reichweite unterscheiden sich die Technologien stark. Mit WLAN werden Geräte üblicherweise über einige zehn bis hundert Meter vernetzt. Bluetooth dagegen wird für die Kommunikation im Nahbereich bis hin zu einigen Metern verwendet. Für den Großteil der Anwendungen im Fahrzeug sollte sich die Kommunikation idealerweise auf den Innenraum beschränken, um die Erzeugung von Interferenzen im Fahrzeugumfeld zu vermeiden. Im Gegenzug ist auch eine minimale Interferenz im Fahrzeug durch aktive Funktechnologien im Umfeld erstrebenswert.

3.2 Anwendungsbereiche

Funkkanäle sind diversen Störeinflüssen ausgesetzt. Durch die Mehrwegeausbreitung unterliegt ein Sendesignal je nach Ausbreitungspfad Effekten wie Reflexionen,

Beugung, Brechung oder Fading. Der Empfänger erhält eine Überlagerung dieser zeitlich verzögerten Anteile, welche die Dekodierung erschweren. Dazu kommen Interferenzen, die zum einen unbeabsichtigt durch Funkssysteme im gleichen Frequenzspektrum hervorgerufen werden, zum anderen muss auch eine beabsichtigte Störung berücksichtigt werden. Eine böswillige Störung des Frequenzbandes darf keinesfalls dazu führen, dass die Sicherheit von Fahrzeuginsassen oder Passanten im Umfeld des Fahrzeugs gefährdet ist. Selbst in einem dedizierten Frequenzband, welches beispielsweise für automobiler Einsatzzwecke freigegeben sein kann, ist eine böswillige Störung nicht auszuschließen.

Durch die genannten Störeinflüsse kann es zu erhöhten Verzögerungen oder zu Frameverlusten kommen. Aus diesem Grund sollten nur die Funktionen über Funkssysteme realisiert werden, die keine oder geringe Sicherheitsanforderungen aufweisen. Außerdem kann die Nutzung von Funktechnologien für sicherheitskritische Anwendungen vom Gesetzgeber untersagt sein.

3.3 Koexistenzuntersuchungen

Um mögliche Anwendungsbereiche für die Funkkommunikation im Fahrzeug zu identifizieren, ist die Untersuchung der Koexistenz von Funksystemen nötig. Einerseits muss die Koexistenz zwischen Funksystemen, die im Fahrzeug fest verbaut sind, sichergestellt werden. Andererseits sind Systeme im Fahrzeugumfeld bzw. durch Insassen ins Fahrzeug gebrachte Systeme zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass der Anspruch eines Kunden an Funkssysteme in einem Oberklasse-Fahrzeug meist höher ist, als bei CE-Geräten. Im Heimgebrauch werden kurze Störungen oft toleriert, wogegen es bei Oberklasse-Fahrzeugen rasch zu Beschwerden des Kunden kommen kann.

Da im Fahrzeug viele Funktechnologien auf engstem Raum aufeinandertreffen, ist die Koexistenz gerade in diesem Bereich sicherzustellen. Im folgenden Abschnitt wird die messtechnische Bestimmung des Pfadverlusts zwischen Funksystemen im Fahrzeug und der Umwelt beschrieben [BBG⁺12a]. Im Gegensatz zu vielen anderen Anwendungsfeldern ist hier ein hoher Pfadverlust im Hinblick auf Interferenzen wünschenswert. Im Anschluss werden Koexistenzmechanismen von Funksystemen im Fahrzeug näher betrachtet und Möglichkeiten zur Verbesserung diskutiert.

3.3.1 Messtechnische Bestimmung des Pfadverlusts

Ziel der messtechnischen Bestimmung des Pfadverlusts ist, Kenntnis über die Funkausbreitung im Fahrzeugumfeld zu erhalten. Der Einfluss des Verbauortes der Antennen sowie die Beschaffenheit der Verglasung auf die Funkreichweite werden untersucht. Aus den Messergebnissen wird schließlich der winkelabhängige Pfadverlust in Abhängigkeit der Antennenpositionen bestimmt. Neben verschiedenen Fahr-

zeug-zu-Freiraum-Messungen wurde auch ein Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario untersucht. Bei den Messungen wurden mehrere Frequenzbereiche betrachtet. In diesem Abschnitt werden jedoch ausschließlich die Ergebnisse für den Frequenzbereich von 2,4 bis 2,5 GHz präsentiert.

Messaufbau

Am Sender sowie am Empfänger werden breitbandige bikonische Antennen verwendet, die in Azimut-Richtung ein omnidirektionales Abstrahlverhalten aufweisen. Die Antennen [OE10] wurden am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität München entwickelt und für die Messungen zur Verfügung gestellt. Die Sendeantenne A_1 wird über das Kabel C_1 an einen Signalgenerator (Agilent Signal Generator N5183A) angeschlossen und für die Messungen an unterschiedlichen Positionen im Fahrzeuginnenraum fixiert. Die Empfangsantenne A_2 ist über das Kabel C_2 mit einem Spektrumanalysator (Agilent Spectrum Analyzer N9010A) verbunden und wird im Fahrzeug-zu-Freiraum-Szenario außerhalb des Fahrzeugs positioniert. Für das Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario wird der Empfänger ebenfalls in der Fahrzeugkabine positioniert. Mit diesem Aufbau wird die Empfangsleistung P_{RX} in Abhängigkeit der Trägerfrequenz, der Entfernung sowie des relativen Winkels zur Drehachse des Fahrzeugs ermittelt. In Abbildung 3.1 ist der Aufbau von Sender und Empfänger dargestellt. Die Sendeleistung P_{TX} des Signalgenerators beträgt in allen Messungen 15 dBm.

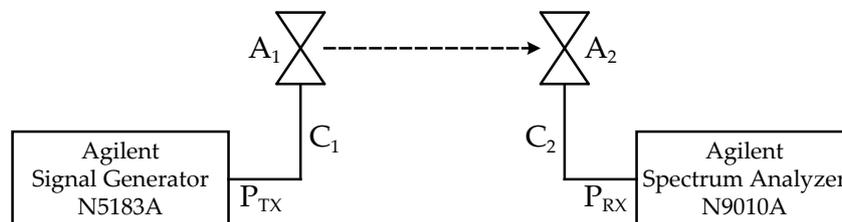


Abbildung 3.1: Aufbau von Sender und Empfänger

In Abbildung 3.2 ist das verwendete Messraster dargestellt. Das Frequenzband wird in Schritten von 5 MHz vermessen. Zur Unterdrückung des Small-Scale-Fadings wird die Empfangsleistung um jeden dieser Messpunkte in einem Frequenzbereich von 10 kHz mit einer Schrittweite von 1 kHz gemessen. Durch eine Mittelungsfunktion im Spektrumanalysator besteht jeder dieser 11 Messpunkte wiederum aus drei Einzelmessungen. Ein Messwert des 5 MHz Rasters ist daher der Mittelwert von 33 einzelnen Messungen. Diese Anzahl an Messwerten stellt einen Kompromiss zwischen Messdauer und Messgenauigkeit dar.

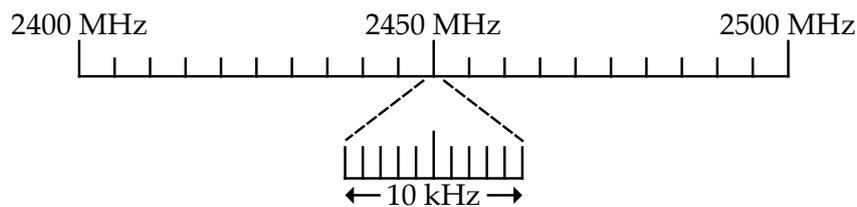


Abbildung 3.2: Übersicht über das Messraster

Antennenpositionen

Um verschiedene Anwendungsbereiche zu adressieren, wurden vier Positionen der Sendeantenne innerhalb des Fahrzeugs ausgewählt. Die Positionen sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

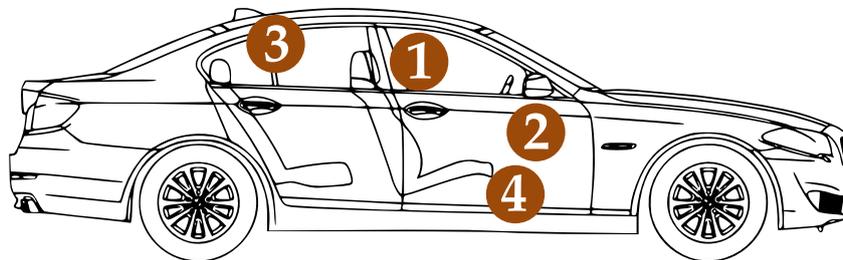


Abbildung 3.3: Positionen der Sendeantenne im Fahrzeug

In Tabelle 3.1 sind zu den vier Antennenpositionen die Höhen über dem Boden sowie eine kurze Bezeichnung der Position angegeben. Position 1 (Kopfposition) repräsentiert ein Gerät in der Nähe des Kopfes des Fahrers (beispielsweise ein Mobiltelefon bzw. Headset). Die Position 2 (Mittelkonsole) entspricht einem Verbauort in der Nähe des zentralen Multimediasystems in der Mittelkonsole. Position 3 (Antennenmodul) befindet sich unterhalb der Dachantenne im Innenraum am Dachhimmel. Hier könnte beispielsweise ein WLAN Access Point für den drahtlosen Internetzugang positioniert sein. Mit Hilfe der vierten Antennenposition (Fußraum Beifahrer) wird die Funkausbreitung bei tiefgelegenen Verbau der Antenne untersucht. Die Empfangsantenne im Fahrzeug-zu-Freiraum-Szenario ist stets auf einer Höhe von 1,6 m über dem Boden positioniert.

Tabelle 3.1: Antennenpositionen im Fahrzeug

Position	Bezeichnung	Höhe über Boden
1	Kopfposition	1,2 m
2	Mittelkonsole	0,8 m
3	Antennenmodul	1,4 m
4	Fußraum Beifahrer	0,6 m

Um auch den Einfluss metallisierter Scheiben auf die Funkausbreitung zu untersuchen, wurde für Antennenposition 3 zusätzlich ein Fahrzeug mit entsprechender Ver-

glasung untersucht. Die Messungen an den Antennenpositionen 1-4 wurden an einem 5er BMW (F10) mit Standardverglasung durchgeführt. Da zum Zeitpunkt der Messungen kein 5er BMW mit metallisierten Scheiben zur Verfügung stand, wurde ein 7er BMW (F01) mit entsprechender Verglasung vermessen. Es ist zu erwähnen, dass bei dem untersuchten Fahrzeug nicht alle Scheiben metallisiert sind. Die Heckscheibe sowie die kleinen Dreieckscheiben im hinteren Bereich der Hecktüren entsprechen der Standardverglasung.

Bestimmung des Pfadverlusts

Die am Messgerät ermittelte Empfangsleistung ist von Störgrößen zu bereinigen. Im betrachteten Aufbau sind dies die Gewinne der Antennen (G_{A_1} und G_{A_2}) sowie die Verluste der Kabel (L_{C_1} und L_{C_2}). Der Pfadverlust (PL) berechnet sich wie folgt:

$$PL \text{ [dB]} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Tx}}{P_{Rx}} \cdot \frac{G_{A_1} G_{A_2}}{L_{C_1} L_{C_2}} \right) \quad (3.1)$$

Fahrzeug-zu-Freiraum-Szenarien

Die Ergebnisse der einzelnen Fahrzeug-zu-Freiraum-Messungen werden in 2D-Polarkoordinatendarstellungen präsentiert. Im Frequenzbereich von 2,4 bis 2,5 GHz wurden insgesamt je Antennenposition 21 Mittenfrequenzen betrachtet. Für die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse wurde eine Mittenfrequenz von 2,45 GHz ausgewählt, welche der Mitte des vermessenen Frequenzbandes entspricht. Das Fahrzeug wurde derart auf der Drehscheibe platziert, dass die Antenne auf der Achse der Scheibe positioniert ist. Die Abbildungen zeigen die Sicht von oben, wobei die Front des Fahrzeugs jeweils auf der rechten Seite liegt. Im Mittelpunkt ist die Sendeantenne platziert. Die eingezeichneten Radien bei 3 m, 5 m, 10 m, 20 m, 35 m und 50 m entsprechen den Entfernungen, in denen der Empfangspegel ermittelt wurde. Für die Darstellungen wurden die dazwischenliegenden Werte interpoliert und können unter Umständen von den dargestellten Werten abweichen. Der Winkel wurde in Schritten von 10 Grad variiert. Für die Messungen, bei denen die Sendeantenne auf der Symmetrieebene des Fahrzeugs positioniert ist (Antennenpositionen 1-3), wurde lediglich eine Seite des Fahrzeugs vermessen und das Ergebnis anschließend für die Darstellung gespiegelt. Eine Testmessung eines Vollkreises zeigte, dass dieses Vorgehen gerechtfertigt ist. Für die Positionierung im Fußraum des Beifahrers wurde der Vollkreis vermessen.

In Abbildung 3.4 sind die Ergebnisse bei Positionierung der Sendeantenne auf der Kopfposition (Position 1) für 2450 MHz dargestellt. Die eingezeichnete schwarze Linie gibt die Entfernung an, bei der der Pfadverlust 80 dB beträgt. Liegt dieser außerhalb von 50 m, ist die Linie gestrichelt dargestellt. 80 dB wurden gewählt, da beispielsweise bei WLAN bei einer Sendeleistung von 0 dBm ab ca. 80 dB Pfadverlust der Empfangspegel gering genug ist, damit der Kanal nicht mehr als belegt erkannt wird. Der

genaue Wert ist jedoch stark von der verwendeten Hardware, der Konfiguration und den Antennen abhängig.

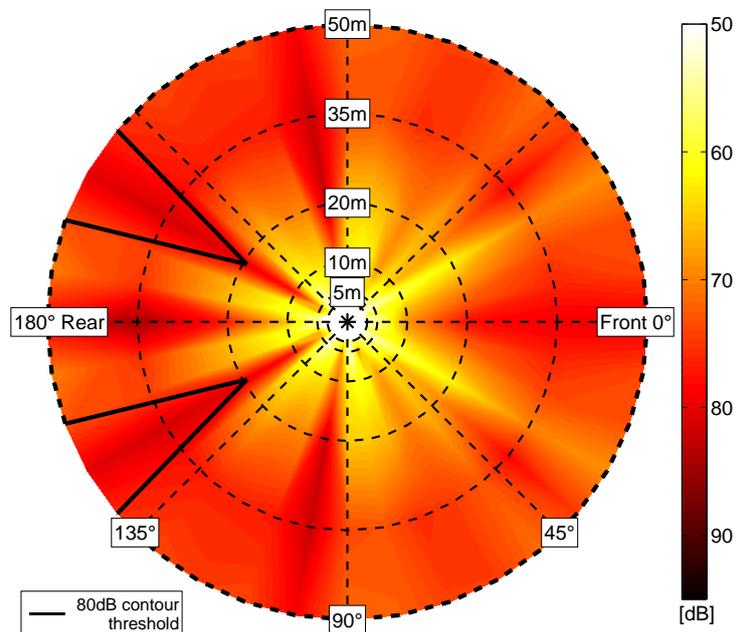


Abbildung 3.4: Kopfposition bei 2450 MHz

Ein heller gelber Farbton entspricht Bereichen mit geringer Dämpfung, wogegen dunklere Farbtöne höheren Dämpfungswerten entsprechen. Im vorderen Bereich des Fahrzeugs ist die Dämpfung gering, sodass der Pfadverlust stets weniger als 80 dB beträgt. Bei 100° sowie 260° fallen Bereiche mit erhöhter Dämpfung auf. Diese lassen sich durch die B-Säulen der Fahrzeugkarosserie erklären. Der Einfluss der C-Säulen ist noch deutlicher zu erkennen. Bei 150° bzw. 210° ist ein erheblich erhöhter Pfadverlust festzustellen. Der Einfluss der A-Säulen ist bei 40° sowie 320° zu erkennen. Auch direkt in Richtung der Front des Fahrzeugs ist der Pfadverlust erhöht, was sich durch den Rückspiegel erklären lässt, welcher im Line-of-Sight-Pfad (LoS-Pfad) zwischen Sende- und Empfangsantenne liegt.

In Abbildung 3.5 sind die Ergebnisse der Messung bei Positionierung der Sendeantenne in der Mittelkonsole (Position 2) dargestellt. Die Variationen im Pfadverlust über den Winkelbereich sind nicht mehr einfach zu deuten, da zwischen Sende- und Empfangsantenne kein LoS-Pfad besteht. Die sich ergebende Verteilung ist das Ergebnis konstruktiver und destruktiver Überlagerungen der Signale durch die Mehrwegeausbreitung. Es lässt sich jedoch feststellen, dass der Pfadverlust 80 dB außer in zwei kleinen Bereichen in der Front des Fahrzeugs bereits bei einer Entfernung unter 50 m überschreitet.

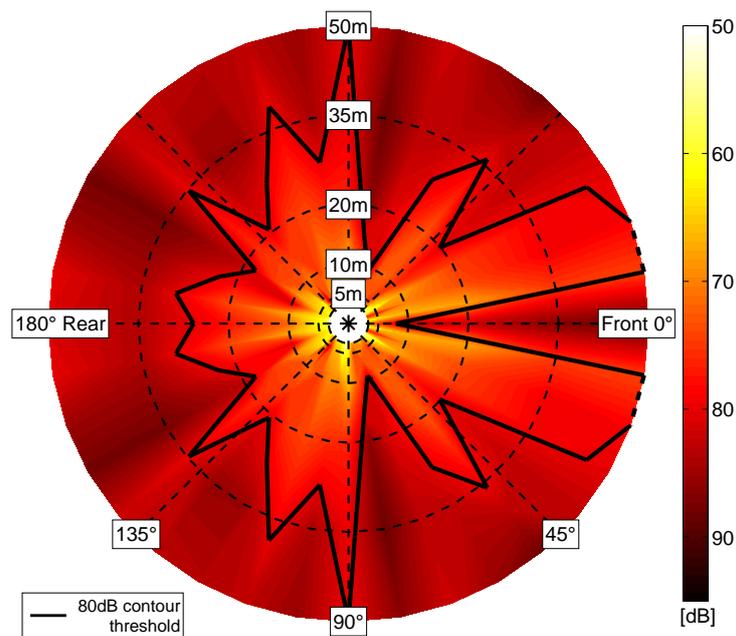


Abbildung 3.5: Mittelkonsole bei 2450 MHz

Bei Positionierung der Antenne direkt unterhalb des Daches (Antennenmodul, Position 3) besteht in Richtung des Fahrzeughecks ein LoS-Pfad zur Empfangsantenne. In Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Pfadverlusts bei Verwendung der Standardverglasung dargestellt. Außer in Richtung der Heckscheibe wird ein Pfadverlust von 80 dB bei unter 50 m Distanz erreicht.

In Abbildung 3.7 sind die Ergebnisse bei Verwendung der metallisierten Scheiben in einem 7er BMW dargestellt. Wie bereits erwähnt, sind die Scheiben im hinteren Bereich des Fahrzeugs nicht metallisiert. Dies ist auch deutlich am Pfadverlust festzustellen. Auch sind die beiden Dreiecksscheiben, die ebenfalls nicht metallisiert sind, deutlich bei 120° sowie 240° zu erkennen. Weiterhin fällt beim Vergleich der Abbildungen 3.6 und 3.7 auf, dass der Pfadverlust in Richtung der Heckscheibe bei metallisierten Scheiben geringer ausfällt. Dies lässt sich durch die erhöhten Reflexionen im Innenraum des Fahrzeugs durch die metallisierten Scheiben erklären. Die abgestrahlte Leistung tritt daher vermehrt im Heckbereich aus.

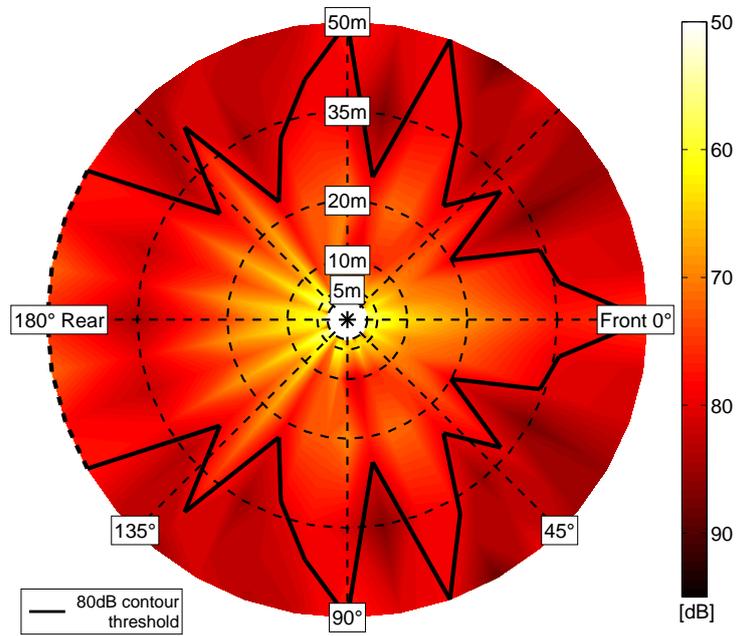


Abbildung 3.6: Antennenmodul bei 2450 MHz

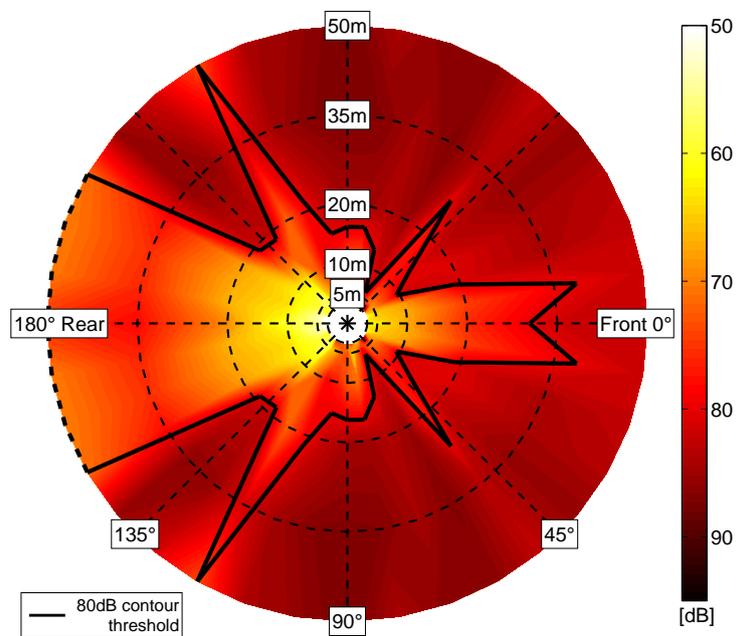


Abbildung 3.7: Antennenmodul mit metallisierten Scheiben bei 2450 MHz

In Abbildung 3.8 sind die Ergebnisse bei Positionierung der Sendeantenne im Fußraum des Beifahrers (Position 4) dargestellt. Das sich ergebende Verteilungsmuster ist nicht symmetrisch, da die Antenne nicht auf der Symmetrieebene des Fahrzeugs liegt, weshalb eine Messung des Vollkreises durchgeführt wurde. Bei dieser Position besteht kein LoS-Pfad zwischen Sende- und Empfangsantenne. Daher ist der Pfadverlust vergleichsweise hoch. Bei einer Distanz von 50 m beträgt dieser stets 80 dB oder mehr.

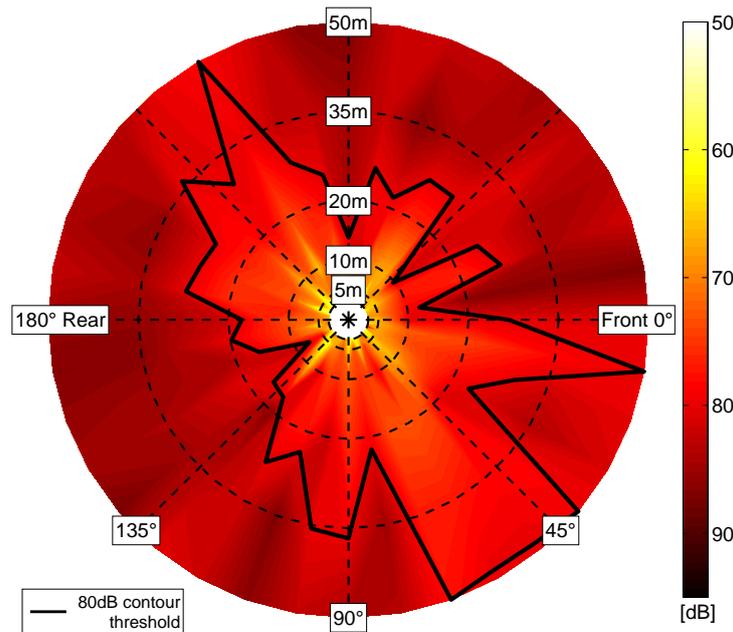


Abbildung 3.8: Fußraum Beifahrer bei 2450 MHz

Zur Bewertung der Antennenpositionen ist in Abbildung 3.9 der gemittelte Pfadverlust über alle gemessenen Winkel für die fünf Szenarien dargestellt. Die Fluktuation bei 3 m Distanz ist sehr stark, was sich durch den geringen Abstand erklären lässt. Der bei Position 3 (Antennenmodul) höhere gemessene Pfadverlust bei 3 m im Vergleich zu einer Distanz von 5 m lässt sich durch Abschattungseffekte begründen. Durch die hohen Positionen von Sende- und Empfangsantenne ist der LoS-Pfad bei kurzen Distanzen durch das Fahrzeugdach unterbrochen, woraus der höhere Pfadverlust resultiert.

Bei der Kopfposition besteht überwiegend eine Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantenne. Daher weist dieses Szenario gemittelt über alle Winkel den geringsten Pfadverlust auf. Obwohl metallisierte Scheiben eine höhere Dämpfung aufweisen, ist der gemittelte Pfadverlust nicht deutlich höher, als beispielsweise bei Positionierung der Sendeantenne im Bereich der Mittelkonsole. Diese Beobachtung lässt sich ebenfalls durch die erhöhte Abstrahlung im Heck des Fahrzeugs (siehe Abbildung 3.7) erklären. Für einige Positionen ist der Pfadverlust bei 50 m geringer als bei einer Distanz von 35 m. Diese Beobachtung lässt sich durch konstruktive bzw. destruktive Interferenz durch die Mehrwegeausbreitung begründen. Bereits bei Be-

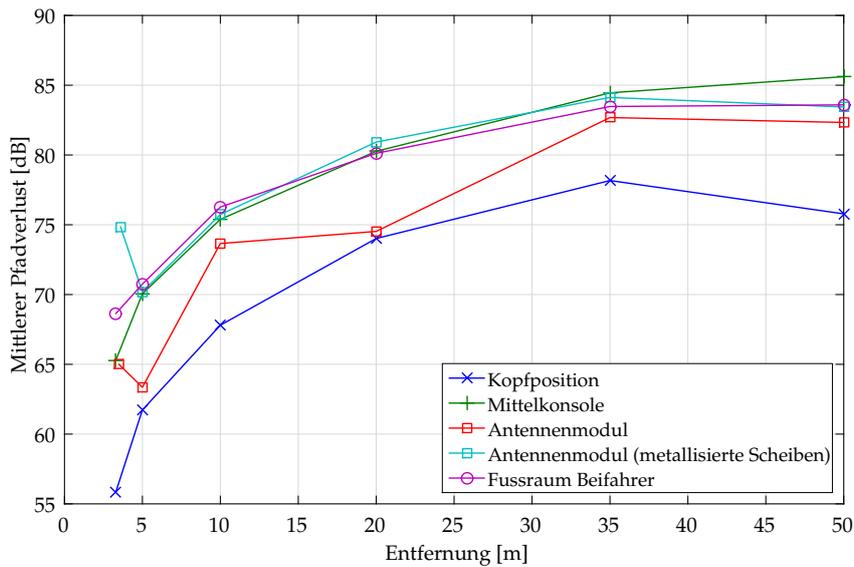


Abbildung 3.9: Mittlerer Pfadverlust bei 2450 MHz

trachtung von nur zwei Pfaden, dem LoS-Pfad zwischen Sende- und Empfangsantenne sowie einer Reflexion am Boden, ist dieser Effekt erkennbar. Durch die komplexe Struktur eines Fahrzeugs kann es zu einer Vielzahl an Reflexionen kommen. Der geringere Pfadverlust bei der Positionierung am Antennenmodul ohne metallisierte Scheiben bei 20 m Entfernung kann beispielsweise durch einen ausgeprägten Signalanteil einer Reflexion auf der wenig gekrümmten Oberfläche des Kofferraums hervorgerufen werden. Zur exakten Analyse dieser Effekte sind jedoch weitere Mess- oder Simulationmethoden nötig.

Um die Variation des Pfadverlusts über den Frequenzbereich zu bewerten, ist in Abbildung 3.10 der mittlere Pfadverlust für die Mittelkonsolen-Position über den Frequenzbereich von 2400-2485 MHz dargestellt. Dieser Bereich entspricht annähernd

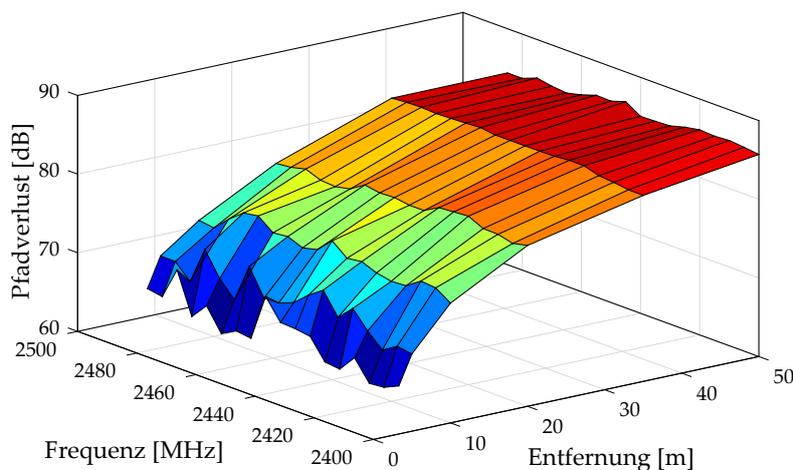


Abbildung 3.10: Mittlerer Pfadverlust (Mittelkonsole) 2400-2485 MHz

dem 2,4 GHz ISM-Band. Bei kurzen Distanzen ist die Fluktuation über den Frequenzbereich vergleichsweise hoch, wogegen sie mit zunehmender Distanz geringer ausfällt.

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario

In diesem Szenario befinden sich Sende- und Empfangsantenne jeweils in einem eigenen Fahrzeug. In Abbildung 3.11 ist das 5x10 m Raster dargestellt, auf dem die Fahrzeuge positioniert wurden. Insgesamt werden sechs Fahrzeugpositionen betrachtet. Wegen der Reziprozität können die nicht dargestellten Positionen durch Spiegelungen erzeugt werden.

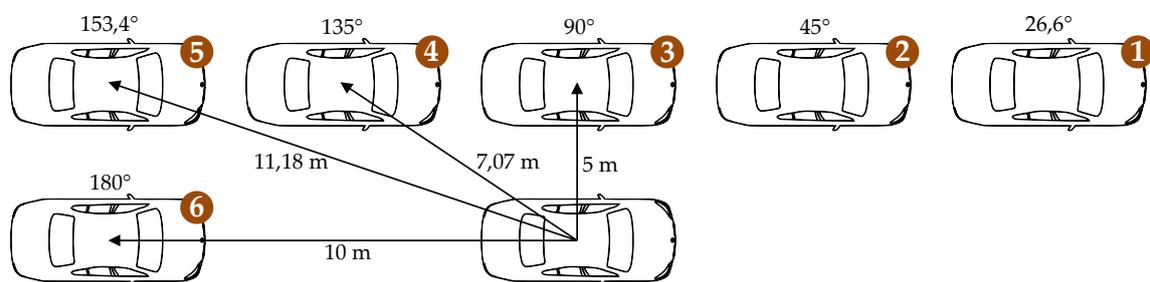


Abbildung 3.11: Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario

Im Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario wurden zwei Antennenpositionen untersucht. In einem Fall befinden sich beide Antennen auf der Kopfposition, im zweiten Fall im Fußraum des Beifahrers. Beide Antennenpositionen wurden für zwei Fahrtrichtungen untersucht. In Abbildung 3.11 ist dargestellt, dass die Fahrzeuge in die gleiche Richtung zeigen. Dieses Szenario entspricht Straßen mit mehreren Fahrspuren, wie beispielsweise Autobahnen. Im zweiten Szenario sind die Fahrzeuge in gegenläufiger Richtung positioniert, was entgegenkommenden Fahrzeugen entspricht. Aus diesem Grund wurde die Position 6 aus Abbildung 3.11 hier nicht untersucht.

In Tabelle 3.2 sind die über das 2,4 GHz Band gemittelten Ergebnisse der untersuchten Positionen dargestellt. In Abbildung 3.9 lässt sich erkennen, dass bei den Antennenpositionen im Fahrzeug-zu-Freiraum-Szenario bei Distanzen unter 20 m zwischen der Kopfposition und der Position im Fußraum des Beifahrers ein Unterschied von 6-9 dB im über alle Winkel gemittelten Pfadverlust gemessen wurde. Je nach Winkel und Distanz variiert der gemessene Wert jedoch stark. Für den direkten Vergleich können die entsprechenden Werte des Pfadverlusts für beide Fahrzeuge aus den Fahrzeug-zu-Freiraum-Messungen entnommen und mit den Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Messungen verglichen werden. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Empfangsantenne beim Fahrzeug-zu-Freiraum-Szenario stets auf einer Höhe von 1,6 m positioniert war. Bereits aus diesem Grund sind die Ergebnisse nicht direkt auf das Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario übertragbar.

Tabelle 3.2: Ergebnisse des Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenarios

Fahrzeug-Position	Fahrtrichtung Kopfposition	Gegenrichtung Kopfposition	Fahrtrichtung Fußraum BF	Gegenrichtung Fußraum BF
1	67,94 dB	63,20 dB	86,43 dB	86,16 dB
2	76,67 dB	64,16 dB	84,37 dB	85,75 dB
3	54,26 dB	51,19 dB	82,94 dB	84,95 dB
4	66,26 dB	68,26 dB	84,26 dB	83,55 dB
5	64,75 dB	70,12 dB	85,39 dB	85,95 dB
6	72,39 dB	-	85,48 dB	-

Bei den Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Messungen ist die Dämpfung des Signals durch die zwei Fahrzeugkarosserien in etwa doppelt so hoch. Daher ist auch der Unterschied im Pfadverlust im Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario entsprechend größer. Bei Positionierung beider Fahrzeuge in gleicher Richtung ist der Pfadverlust im Mittel über die sechs Fahrzeugpositionen im Fußraum des Beifahrers im Vergleich zur Kopfposition um 17,7 dB höher. Sind die Fahrzeuge in entgegengesetzter Richtung positioniert, beträgt der Unterschied im Mittel 21,9 dB. Weiterhin ist festzustellen, dass die Ausrichtung des zweiten Fahrzeugs bei Positionierung der Antenne im Fußraum des Beifahrers nur sehr geringe Auswirkungen auf den Pfadverlust hat. Die maximale Abweichung bei geänderter Fahrzeugrichtung beträgt 2 dB (Fahrzeugposition 3). Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede kann die geänderte Distanz von Sendee- und Empfangsantenne sein. Beispielsweise auf Fahrzeugposition 3 beträgt die Distanz der Fußräume der Beifahrer bei gleicher Richtung exakt 5 m, bei Gegenrichtung ist die Distanz jedoch höher, was in der Regel zu einem erhöhten Pfadverlust führt.

Fazit

Mit Hilfe einer geeigneten Positionierung der Antennen kann die Koexistenz von Funksystemen im Fahrzeug entscheidend beeinflusst werden. Um einerseits die Interferenzen von Funksystemen im Umfeld des Fahrzeugs zu minimieren, jedoch auch zur Minimierung der erzeugten Interferenz im Fahrzeugumfeld, ist ein tief gelegener Verbauort der Antennen zu bevorzugen. Dadurch werden LoS-Pfade zu Funksystemen in der Umgebung vermieden. Zusätzlich kann der Wirkungsbereich von Funksystemen im Fahrzeug durch Materialeigenschaften beeinflusst werden. Durch die Verwendung von metallisierten Scheiben wird der Pfadverlust erhöht, was in diesem Fall eine gewünschte Eigenschaft darstellt. Die Untersuchungen mit metallisierten Scheiben zeigen, dass in Bezug auf die Koexistenz eine komplette Verglasung mit metallisierten Scheiben erstrebenswert ist. Ein Nachteil von metallisierten Scheiben ist jedoch, dass ungewollt beispielsweise auch die Dämpfung zwischen Mobiltelefonen im Fahrzeug und den externen Basisstationen erhöht wird.

Für die Messungen wurden omnidirektionale Antennen verwendet. Werden speziell an den Verbauort angepasste gerichtete Antennen eingesetzt, kann die Interferenz

weiter reduziert werden. Die Sendeleistung stellt einen weiteren Optimierungsparameter dar. Aufgrund der geringen Distanzen im Fahrzeug kann die Sendeleistung deutlich reduziert werden, wodurch weniger Interferenzen im Umfeld des Fahrzeugs erzeugt werden.

3.3.2 Koexistenz von Funksystemen

Neben der Koexistenz zu Funksystemen im Fahrzeugumfeld muss auch die Koexistenz zwischen den Funksystemen im Fahrzeug betrachtet werden. Im Fahrzeug treffen die Systeme auf engstem Raum aufeinander, sodass davon auszugehen ist, dass sich jedes Gerät in Sende- bzw. Empfangsreichweite der anderen Geräte befindet. Arbeiten die Systeme im selben Frequenzband, entstehen somit Interferenzen zwischen den einzelnen Systemen. Sind die Systeme und deren Mechanismen bekannt, können bereits bei der Fertigung im Werk Maßnahmen getroffen werden, um die Koexistenz der Systeme zu verbessern.

In heutigen Oberklasse-Fahrzeugen kommt bereits eine Vielzahl von Funksystemen zum Einsatz. In diesem Abschnitt werden drei der gängigsten Systeme betrachtet, die bereits erwähnt wurden: WLAN, Bluetooth und Kleer. Weiterhin werden ausschließlich Systeme im 2,4 GHz Band betrachtet. Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften der Systeme in Bezug auf die Koexistenz erläutert.

Wireless Local Area Network

Der IEEE 802.11 Standard [IEE12c] definiert Kanäle mit unterschiedlicher Bandbreite. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle im 2,4 GHz Band ist landesabhängig und beträgt beispielsweise in Europa 13, in den USA 11 und in Japan 14. Fahrzeuge werden international vertrieben, wodurch die 11 Kanäle berücksichtigt werden, die international definiert sind. Die Verwendung einer Kanalbandbreite von 20 MHz ist weit verbreitet, Erweiterungen des Standards unterstützen aber auch höhere Bandbreiten von 40 MHz und im 5 GHz Band zusätzlich 80 oder 160 MHz. Bei Verwendung einer Bandbreite von 20 MHz ist diese in 64 Unterträger zu je 312,5 kHz unterteilt. Die Spektrums-Maske erfordert, dass der Pegel in einem Abstand von ± 11 MHz um die Mittenfrequenz f_c weniger als -30 dB (-30 dB relativ zum Spitzenwert des $\frac{\sin x}{x}$) beträgt. Daher sind im Randbereich nicht alle Träger genutzt, um Schutzabstände zu anderen Kanälen bereitzustellen. Die Anzahl der als Schutzabstand definierten Kanäle hängt von der Art der WLAN-Station ab. Wird eine nicht-HT-Station (High Throughput) verwendet, werden von den 64 Unterträgern insgesamt 52 Träger genutzt. Daraus ergibt sich eine effektiv genutzte Bandbreite von 16,25 MHz. Insgesamt lassen sich drei der 11 Kanäle im 2,4 GHz ISM-Band überlappungsfrei nutzen. Üblicherweise werden deswegen nur die Kanäle 1, 6 und 11 genutzt. Die maximal erlaubte Sendeleistung liegt bei 20 dBm Equivalent Isotropically Radiated Power (EIPR). Marktübliche Geräte verwenden jedoch meist eine niedrigere Sendeleistung.

In Bezug auf die Koexistenz prüft eine WLAN-Station vor einer Übertragung, ob der Kanal frei ist. Nur falls der Kanal als frei erkannt wird, erfolgt im Anschluss ein Übertragungsversuch. Für die Prüfung des Trägers mittels Energy Detection ist die Clear Channel Assessment (CCA) Funktion zuständig. Liegt der Empfangspegel bei Verwendung des OFDM-PHYs (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) und einer Bandbreite von 20 MHz bei mindestens -82 dBm, muss eine Station laut Standard den Kanal mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90% innerhalb von 4 μ s als belegt erkennen.

Bluetooth

Die Bluetooth-Spezifikation [Blu14] definiert auf der physikalischen Schicht ein Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping). Dazu sind im 2,4 GHz Band 79 Kanäle von 2402 MHz bis 2480 MHz mit einem Abstand von jeweils 1 MHz definiert. Der aktuell verwendete Kanal kann bis zu 1600-mal pro Sekunde gewechselt werden. In Bezug auf die maximale Sendeleistung werden Bluetooth-Geräte laut Standard in drei Klassen eingeteilt. Diese Klassen sind in Tabelle 3.3 jeweils mit der minimalen und maximalen Sendeleistung angegeben.

Tabelle 3.3: Bluetooth-Klassen der Sendeleistung

Klasse	Minimale Sendeleistung	Maximale Sendeleistung
1	0 dBm (1 mW)	20 dBm (100 mW)
2	-6 dBm (0,25 mW)	4 dBm (2,5 mW)
3	-	0 dBm (1 mW)

Seit Bluetooth Version 1.2 wird Adaptive Frequency Hopping (AFH) unterstützt, wodurch der Umgang mit gestörten oder belegten Kanälen verbessert wird. Durch AFH werden die Kanäle in die zwei Kategorien *used* und *unused* eingeteilt. Nur die als *used* markierten Kanäle werden in der Sprungsequenz verwendet, wogegen die *unused* Kanäle von der Sprungsequenz ausgeschlossen werden. Dadurch kann Bluetooth entweder mit allen oder auch mit einer geringeren Anzahl an Kanälen arbeiten. Die minimale Anzahl an benötigten Kanälen liegt bei 20. Die Sprungsequenz selbst ist eine pseudozufällige Sequenz, da sie von der Bluetooth-Geräteadresse abgeleitet wird. Der Master führt eine Channel Map, in der die Kanäle als *unbekannt*, *schlecht* oder *gut* klassifiziert sind. Dazu erhält der Master auch von den Slaves Informationen über deren Kanalstatus. Durch einen Eingriff in die Channel Map des Masters können daher Frequenzbereiche explizit ausgeschlossen werden.

Kleer

Der proprietäre Kleer Standard [Kle07] wird bereits von mehreren Automobilherstellern für die drahtlose Übertragung von Audio-Signalen in CD-Qualität vom Rear-

Seat-Entertainment-System an die Kopfhörer genutzt. Auf der physikalischen Schicht wird eine dynamische Wahl des Kanals (Dynamic Channel Selection) eingesetzt. Im 2,4 GHz Band sind 16 Kanäle zu je 3 MHz definiert. Eine Besonderheit von Klear ist, dass es auch im unteren und oberen Schutzband des 2,4 GHz Bandes arbeiten kann, die beispielsweise nicht von WLAN genutzt werden. Außerdem kann Klear auch zwischen zwei benachbarten überlappungsfreien WLAN-Kanälen arbeiten. Die verfügbaren Kanäle werden dauerhaft geprüft, sodass der Kanal bei erhöhter Störung auf dem aktuellen Kanal rasch gewechselt werden kann.

Fazit

Die betrachteten Technologien bieten bereits unterschiedliche Mechanismen zur Verbesserung der Koexistenz. Bei WLAN können für benachbarte Netze überlappungsfreie Kanäle ausgewählt werden, um die gegenseitige Beeinflussung zu verhindern. Eine automatische Wahl des Kanals ist im Standard nicht beschrieben. Es besteht jedoch die Möglichkeit, auf anderer Ebene in die Kanalwahl einzugreifen. Verschiedene Router für den Heimgebrauch mit integriertem WLAN Access Point bieten die Option, den Kanal automatisch auswählen zu lassen. Dazu wird der Kanal auf Netze in der Nachbarschaft geprüft und daraufhin ein Kanal ausgewählt, bei dem von den geringsten Störungen auszugehen ist. Im Detail wird der Auswahlmechanismus jedoch nicht erläutert. Bluetooth und Klear dagegen können die Belegung oder Störung auf Kanälen aktiv erkennen und diese Kanäle im Anschluss vom Sprungmuster ausschließen bzw. den aktuellen Kanal wechseln. Besitzt man die Kontrolle über den Access Point bzw. den Bluetooth-Master, kann aktiv eingegriffen werden. Diese Möglichkeit wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.3 Verbesserung der Koexistenz

Die Konfiguration der im Fahrzeug verbauten Kommunikationstechnologien obliegt dem Automobilhersteller. Hierbei kann der Vorteil genutzt werden, dass die verbauten Systeme bekannt sind. Falls mehrere WLAN Access Points vorhanden sind, können überlappungsfreie Kanäle ausgewählt werden. Die durch WLAN belegten Kanäle können in der Channel Map des Bluetooth-Masters maskiert werden, sofern ausreichend Bandbreite vorhanden ist. Ist mehr als ein Bluetooth-Piconetz vorhanden, können je nach verfügbarer Bandbreite unterschiedliche Konfigurationen vorgenommen werden. Im Idealfall stehen zwei jeweils insgesamt 20 MHz umfassende Bereiche zur Verfügung, um zwei Piconetzen getrennte Frequenzbereiche zuzuordnen. Ist dies nicht möglich, sollte die Überlappung möglichst gering sein, da die Kollisionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Überlappung ansteigt. Klear kann so konfiguriert werden, dass es bevorzugt an den Randbereichen des 2,4 GHz Bandes arbeitet, in denen die anderen Funksysteme nicht arbeiten. Werden mehr als zwei Kanäle benötigt, können die Schutzabstände zwischen den überlappungsfreien WLAN Kanälen verwendet werden.

Bereits im Werk kann eine Vorkonfiguration vorgenommen werden, um die gegenseitige Beeinflussung der Systeme im Fahrzeug zu minimieren. Es können mehrere Konfigurationen definiert werden, um die gegenseitige Störung auch beim Aufeinandertreffen von Fahrzeugen im Straßenverkehr zu minimieren.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung eines Koexistenzmanagers im Fahrzeug dar. An einer zentralen Stelle werden die Informationen über aktive Funksysteme im Fahrzeug sowie Störungen im Umfeld des Fahrzeugs erfasst. Der Koexistenzmanager kann in Abhängigkeit der aktuellen Interferenzsituation die eigenen Systeme so konfigurieren, dass die Störungen minimiert werden. In Bezug auf die Koexistenz ist es wünschenswert, dass die Anzahl der Technologien auf ein Minimum reduziert wird, damit der Spielraum des Koexistenzmanagers vergrößert wird. Beispielsweise können WLAN Access Points im Fahrzeug zu einem einzigen Access Point zusammengefasst werden, wodurch die belegte Bandbreite reduziert wird. Allerdings sinkt damit auch die maximal erreichbare Datenrate, da sich die Systeme in diesem Fall einen Kanal teilen. Gleiches gilt für Bluetooth-Piconetze. Kleer besitzt bereits die vorteilhafte Eigenschaft, dass für einen Multicast-Stream nur ein Kanal benötigt wird. Sollen unterschiedliche Audioströme übertragen werden, sind getrennte Kanäle nötig.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, sind die Antennen im Fahrzeug so zu verbauen, dass die Interferenzen aus dem Fahrzeugumfeld minimiert werden. Außerdem ist auch die Sendeleistung anzupassen, um im Umfeld des Fahrzeugs lediglich ein Minimum an Interferenzen zu erzeugen.

3.4 Zusammenfassung

Für die Verwendung von Funksystemen im Fahrzeug muss eine Vielzahl an Aspekten betrachtet werden. Generell können Störungen, ob unbeabsichtigt oder mutwillig erzeugt, nicht völlig ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund ist die Funkkommunikation nicht für sicherheitsrelevante Funktionen geeignet. Selbst in einem dedizierten Frequenzband, das ausschließlich für bestimmte Anwendungsbereiche freigegeben ist, kann eine böswillige Störung nicht ausgeschlossen werden. Daher wird die Funkkommunikation in der Regel für die Anbindung von Geräten im Infotainmentbereich sowie von CE-Geräten verwendet. Weiterhin wird die drahtlose Kommunikation in Bereichen verwendet, in denen Leitungen nicht verlegt werden können. Ein Beispiel ist ein Sensor zur Messung des Reifendrucks, der sich direkt am Reifen befindet und über Energy Harvesting mit Energie versorgt wird.

Bei Funksystemen ist zwischen Systemen zu unterscheiden, die fest im Fahrzeug verbaut sind und solchen, die sich im Fahrzeugumfeld befinden bzw. durch Insassen in die Fahrzeugkabine gebracht werden. Positiv ist zu erwähnen, dass durch die Fahrzeugkarosserie eine deutliche Dämpfung des Signalpegels erreicht wird, wodurch die

Interferenzen aus dem Umfeld sowie die im Umfeld erzeugten Interferenzen reduziert werden. Messungen zeigen, dass der Wirkungsbereich von Funksystemen dennoch vergleichsweise groß ist. Das Umfeld ist besonders in Situationen, in denen Fahrzeuge auf engem Raum zusammentreffen, beispielsweise auf mehrspurigen Straßen sowie in Stausituationen, zu berücksichtigen. Die Antennen sollten tief im Fahrzeug verbaut sein, um Sichtpfade zu verhindern. Weiterhin ist die Sendeleistung auf den tatsächlichen Bedarf zu reduzieren. Die Verwendung eines Koexistenzmanagers ist sinnvoll, um zum einen die Koexistenz der Funksysteme im Fahrzeug untereinander zu optimieren, zum anderen um auf auftretende Störer dynamisch reagieren zu können.

Die Zukunftssicherheit spielt ebenfalls eine große Rolle, da Fahrzeuge die heute verkauft werden, mindestens 10-20 Jahre auf den Straßen unterwegs sein werden. Werden die lizenzfreien ISM-Bänder genutzt, ist eine Vorhersage der Interferenzen kaum möglich. Zum einen können weitere Funksysteme hinzukommen, die im selben Frequenzband arbeiten, zum anderen kann die Auslastung des Kanals durch bestehende Systeme mit erhöhtem Kommunikationsbedarf steigen. Für WLAN wird im Heimbereich schon jetzt zusätzlich das 5 GHz ISM-Band genutzt, das auch im Fahrzeug verwendet werden kann. Allerdings ist bereits heute davon auszugehen, dass auch dieses Frequenzband in Zukunft stärker ausgelastet sein wird. Daher kann keine Garantie ausgesprochen werden, dass aktuell verbaute Funktechnologien auch in einigen Jahren noch zufriedenstellend arbeiten.

4 Powerline-Kommunikation als Ersatz der LIN-Verkabelung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und Standards der Powerline-Kommunikation erläutert. Wie bereits in Abschnitt 2.5.1 herausgearbeitet, eignet sich besonders die Ersetzung der aktuellen LIN-Infrastruktur als erste Realisierung eines PLC-Systems. Um die Kosten zu reduzieren, wird die Nutzung von Standardkomponenten bevorzugt. Aus diesem Grund werden im Folgenden etablierte PLC-Standards mit den wichtigsten Eigenschaften der physikalischen sowie der Medienzugriffsschicht vorgestellt. Weiterhin werden die Anforderungen zusammengefasst, die an ein PLC-System gestellt werden, welches die heutige LIN-Infrastruktur ersetzen soll.

4.1 Einführung in die Powerline-Kommunikation

Die Übertragung von Nutzdatensignalen auf Stromleitungen hat sich in den vergangenen Jahren rasch weiterentwickelt. Besonders durch die zunehmende Verfügbarkeit von Breitband-Internetanschlüssen Anfang dieses Jahrhunderts begann die Suche nach kostengünstigen Alternativen zum Verlegen neuer Kabel beispielsweise in alten Gebäuden, um Rechner mit dem Internet zu verbinden. In der Regel sind in jedem Zimmer eines Gebäudes mehrere Steckdosen vorhanden, was die Entwicklung von PLC-Systemen motivierte [Phi02]. Über die Jahre sind daher verschiedene Standards und Produkte für die Vernetzung von Computersystemen entstanden. Das grundlegende Prinzip der gleichzeitigen Nutzung von Leitungen für die Strom- und Datenübertragung ist dabei nicht neu. Beispielsweise wurde es bereits bei der analogen oder digitalen Telefonie mittels ISDN (Integrated Services Digital Network) angewendet, da über die Leitungen zum einen analoge Sprachsignale bzw. digitale Signale übertragen werden. Zum anderen werden die Analogtelefone oder der ISDN-NTBA (Network Termination for Basic Access) über die Telefonleitung mit Energie versorgt.

Die Powerline-Kommunikation ist vom Grundgedanken her vergleichbar zu Power over Data (PoD). Beide Varianten nutzen dieselbe Leitung sowohl für die Stromversorgung, als auch für die Übertragung von Nutzdaten. Der wesentliche Unterschied ist in der Art der verwendeten Leitungen zu finden. PLC nutzt Leitungen, die ursprünglich exklusiv der Energieübertragung dienten, zusätzlich für die Übertragung von Daten. PoD dagegen verwendet Leitungen zusätzlich zur Energieversorgung, die zuvor exklusiv für die Datenübertragung genutzt wurden. Daher unterscheiden sich

meist auch die verwendeten Kabel deutlich voneinander. Bei PLC wird in der Regel über dickere Leitungen übertragen, die auch höhere Ströme transportieren können. PoD dagegen nutzt die überwiegend dünnen Datenleitungen, um zusätzlich Strom zu übertragen. Als Beispiel für PLC ist die Vernetzung von Rechnern über die Stromleitungen zu nennen. Power over Ethernet ist dagegen ein geeignetes Beispiel für PoD.

4.2 Bestehende Standards

Für verschiedene Anwendungsbereiche sind über die Jahre unterschiedliche PLC-Standards entstanden. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die wichtigsten bestehenden Standards und deren Kerneigenschaften. Da Standardkomponenten bevorzugt werden, fällt die Auswahl auf die bereits weit verbreiteten Standards der HomePlug Alliance, der ITU-T sowie der HD-PLC Alliance.

4.2.1 HomePlug

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Standards der HomePlug Alliance erläutert. Zunächst werden die einzelnen Standards mit den wichtigsten Eigenschaften der physikalischen Schicht vorgestellt. Im Anschluss wird auf die Medienzugriffsschicht eingegangen.

Im März 2000 wurde die HomePlug Alliance gegründet [HP105], der heute eine Vielzahl von Sponsoren und Mitgliedern angehören. 2001 wurde der HomePlug 1.0 Standard veröffentlicht [HP101]. Der Standard wurde entwickelt, um eine Datenübertragung über Stromleitungen mit einer Netzfrequenz von 50 oder 60 Hz zu ermöglichen.

Auf der physikalischen Schicht wird FFT-OFDM (Fast Fourier Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) eingesetzt. Durch die Unterteilung in schmalbandige Träger kann mit frequenzselektiven Störungen umgegangen werden. HomePlug 1.0 definiert 84 Unterträger in einem Frequenzband von 4,5-21 MHz. Um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren, wird eine Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction, FEC) und die Verwürfelung der Daten (Interleaving) vor der Übertragung eingesetzt. Die Frame Control (FC) wird durch einen Turbo Code geschützt. Um die Übertragungsqualität zu steigern, werden bei jeder Übertragung nur die Unterträger mit ausreichendem Signal-Rauschabstand (SNR, Signal-to-Noise Ratio) ausgewählt. Auf jedem verwendeten Unterträger wird die Modulationsstufe und die Vorwärtsfehlerkorrektur in Abhängigkeit des Empfänger-Signalpegels angepasst. Verfügbare Modulationsstufen sind Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) $\frac{1}{2}$, Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) $\frac{1}{2}$ und DQPSK $\frac{3}{4}$. Um die Modulationsstufen vor der Übertragung zu kennen, tauschen die Stationen in regelmäßigen zeitlichen Abständen Messwerte der Empfangspegel der einzelnen Träger aus und speichern diese in sogenannten Tone Maps.

Zusätzlich ist ein ROBO (Robust OFDM) Mode definiert, der eine Übertragung mit erhöhter Redundanz zur Verfügung stellt. Der ROBO Mode nutzt DBPSK $\frac{1}{2}$ und eine redundante Übertragung der Bit in Zeit und Frequenz. Die maximale Übertragungsrate des HomePlug 1.0 Standards auf der physikalischen Schicht beträgt 13,78 Mbit/s.

Im Jahr 2005 wurde der HomePlug AV Standard [HPA05] (AV für Audio/Video) als Erweiterung des HomePlug 1.0 Standards verabschiedet. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Träger, Verwendung höherer Modulationsstufen und durch eine Verringerung des Overheads durch die Vorwärtsfehlerkorrektur liegt die maximale physikalische Datenrate bei knapp 200 Mbit/s. In Abhängigkeit des Signalpegels auf den Trägern wird auch beim HomePlug AV Standard Adaptive Bit Loading auf den Trägern eingesetzt, um die Datenrate an die Kanalqualität anzupassen. Die wichtigsten Parameter der physikalischen Schicht sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Parameter des HomePlug AV Standards

Parameter	Wert
Frequenzband	2-30 MHz
Maximale Anzahl an Trägern	1155
Trägerabstand	24,414 kHz
Modulationsstufen	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM
Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC)	Turbo-Code mit Coderate $\frac{1}{2}$ oder $\frac{16}{21}$
PHY-Datenrate	ROBO Mode: 4, 5 oder 10 Mbit/s Adaptive Bit Loading: 20 bis 200 Mbit/s

Die angegebene maximale PHY-Datenrate ist ein rein theoretischer Wert und bezieht sich auf die Verwendung der Broadcast Tone Mask mit 917 Trägern. Die Anzahl beruht auf der nötigen Maskierung einiger Träger für den Einsatz in Nordamerika. Über folgende Formel kann die maximale PHY-Datenrate bestimmt werden:

$$R_{PHY_max} = \frac{\#\text{Träger} \cdot \frac{\text{Bit}}{\text{Träger}}}{T_{OFDM_Symbol}} \quad (4.1)$$

Für das Maximum wird eine 1024 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) ohne Turbo-Code verwendet. Die Dauer T_{OFDM_Symbol} eines OFDM-Symbols ist im Standard mit $(40,96 \mu\text{s} + \text{GI})$ angegeben. GI entspricht einem Guard Intervall, welches mit einem Minimum von $5,56 \mu\text{s}$ definiert ist. Bei der angegebenen maximalen Datenrate von 200 Mbit/s wird die Vorwärtsfehlerkorrektur nicht berücksichtigt:

$$R_{AV_PHY_max} = \frac{917 \text{ Träger} \cdot \frac{10 \text{ Bit}}{\text{Träger}}}{(40,96 \mu\text{s} + 5,56 \mu\text{s})} = 197,1195 \text{ Mbit/s} \quad (4.2)$$

Die Anzahl der ROBO Modes wurde mit dem HomePlug AV Standard auf drei erhöht. Der Mini-ROBO Mode überträgt die Daten mit der höchsten Redundanz. Fünf

Kopien der zu übertragenden Daten werden über die verfügbaren Träger verteilt parallel übertragen. Mit dem Standard ROBO Mode werden vier Kopien der zu übertragenden Daten gleichzeitig ausgesendet, wodurch die Datenrate auf knapp 5 Mbit/s ansteigt. Der High Speed ROBO Mode bietet die höchste Datenrate, jedoch auch die niedrigste Redundanz. Die drei Modi sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. In der letzten Spalte ist angegeben, welcher PHY Block (PB) für die Übertragung der Daten verwendet wird. Auf die PHY Blocks wird im Abschnitt zum Medienzugriff nochmals eingegangen.

Tabelle 4.2: HomePlug AV ROBO Modes

ROBO Mode	PHY Rate	# Kopien	PHY Block
Mini	3,8 Mbit/s	5	PB136
Standard	4,9 Mbit/s	4	PB520
High Speed	9,8 Mbit/s	2	PB520

Die in Tabelle 4.2 angegebenen Datenraten beziehen sich erneut auf die Broadcast Tone Mask mit 917 Trägern, die stets für die ROBO Modes verwendet wird. Die Kopien der zu übertragenden Information werden basierend auf einem vorgegebenen Algorithmus auf die Träger aufgeteilt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Stationen keine Tone Maps für die einzelnen Verbindungen führen müssen.

Ist die Anzahl der verfügbaren Träger höher als bei Verwendung der Broadcast Tone Mask, kann theoretisch auch die Datenrate erhöht werden. Da dieses Verhalten nicht dem Standard entspricht, ist für diese Modifikation allerdings eine Anpassung der Firmware oder Hardware nötig. Im Folgenden wird gezeigt, wie die maximale physikalische Datenrate in Abhängigkeit der verfügbaren Träger bestimmt werden kann. Auf jedem Träger wird ein OFDM-Symbol übertragen, das in Abhängigkeit der Modulation eine bestimmte Anzahl an Bit pro Symbol beinhaltet. Zusätzlich muss die Coderate des Turbo-Codes berücksichtigt werden. Die ROBO-Modes nutzen ausschließlich QPSK und die Coderate des Turbo-Codes beträgt $\frac{1}{2}$.

$$R_{ROBO_PHY_max} = \frac{\# \text{ Träger} \cdot \frac{\text{Bit}}{\text{Träger}} \cdot \text{Coderate}}{\# \text{ Kopien} \cdot T_{OFDM_Symbol}} \quad (4.3)$$

Die Dauer eines OFDM-Symbols kann erneut dem Standard entnommen werden und beträgt $40,96 \mu\text{s}$ plus Guard Intervall. Das Guard Intervall beim Standard und High Speed ROBO Mode beträgt $5,56 \mu\text{s}$, beim Mini-ROBO Mode $7,56 \mu\text{s}$. Die Anzahl der Träger wird immer auf ein Vielfaches der Anzahl der Kopien abgerundet. In Tabelle 4.3 sind die maximalen Datenraten der physikalischen Schicht in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Träger angegeben.

Für Smart Grid Anwendungen veröffentlichte die HomePlug Smart Energy Technical Working Group im Jahr 2010 einen weiteren Standard. Der HomePlug Green PHY Standard [HPG10] besteht im Wesentlichen aus einer Untermenge der Eigenschaften des HomePlug AV Standards. Das Ziel ist eine kostengünstige und stromsparende

Tabelle 4.3: PHY-Datenraten der HomePlug AV ROBO Modes

ROBO Mode	maximale PHY-Datenrate	
	917 Träger	1155 Träger
Mini	3,7716 Mbit/s	4,7609 Mbit/s
Standard	4,9226 Mbit/s	6,1909 Mbit/s
High Speed	9,8452 Mbit/s	12,4033 Mbit/s

Variante mit hoher Übertragungszuverlässigkeit und Kompatibilität zu HomePlug AV bzw. IEEE 1901 (siehe Abschnitt 4.2.4). Für die Modulation wird ausschließlich QPSK eingesetzt und der Turbo-Code verwendet eine Coderate von $\frac{1}{2}$. Dadurch kann die Hardware deutlich vereinfacht werden. Weiterhin stehen ausschließlich die drei ROBO Modes des HomePlug AV Standards zur Verfügung. Da die ROBO Modes keine Tone Maps benötigen, kann die Hardware auch hier vereinfacht werden. Neben Smart Grids wird HomePlug Green PHY zusätzlich bereits für die Lade-Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und den Ladestationen eingesetzt [LGSW12].

Im März 2012 wurde die HomePlug AV2 Spezifikation [HPA12] veröffentlicht. Um die Datenrate weiter zu erhöhen, nutzt der HomePlug AV2 Standard zusätzlich das Frequenzband von 30-86 MHz, was die maximale Anzahl an Trägern auf 3455 erhöht. Weiterhin wurde als maximale Modulationsstufe eine 4096 QAM festgelegt und die Coderate des Turbo-Codes auf $\frac{8}{9}$ erhöht. Zusätzlich nutzt HomePlug AV2 Multiple Input Multiple Output (MIMO) mit Beamforming. MIMO nutzt zwei virtuelle Leiterpaare, falls drei Stromleitungen vorhanden sind. In älteren Häusern, in denen oft nur zwei Leitungen vorhanden sind, wird automatisch auf Single Input Single Output (SISO) umgeschaltet. Die physikalische Schicht des HomePlug AV2 Standards wird als „Gigabit Class PHY“ beworben. Mit Formel 4.1 kann die maximale PHY-Datenrate bestimmt werden. Erneut wird die Vorwärtsfehlerkorrektur nicht berücksichtigt. Für die Berechnung wird die höchste Modulationsstufe (QAM 4096) verwendet. Außerdem kann im HomePlug AV2 Standard das Guard Intervall auf Null gesetzt werden. Im SISO Fall ergibt sich damit die beworbene Datenrate von knapp über 1 Gbit/s (siehe Gleichung 4.4). Mit MIMO wird die Datenrate durch die zwei parallelen Streams verdoppelt (Gleichung 4.5).

$$R_{AV2_PHY_max_SISO} = \frac{3455 \text{ Träger} \cdot \frac{12 \text{ Bit}}{\text{Träger}}}{40.96 \mu\text{s}} = 1012,2070 \text{ Mbit/s} \quad (4.4)$$

$$R_{AV2_PHY_max_MIMO} = 2 \cdot \frac{3455 \text{ Träger} \cdot \frac{12 \text{ Bit}}{\text{Träger}}}{40.96 \mu\text{s}} = 2024,4141 \text{ Mbit/s} \quad (4.5)$$

MAC-Schicht

Für den Medienzugriff wird ein Knoten im Netz als Central Coordinator (CCo) ausgewählt. Der CCo sendet Beacons in Abhängigkeit der Netzfrequenz (siehe Abbildung 4.1). Mit einem festen Versatz sendet der CCo nach jedem zweiten positiven

Nulldurchgang einen Beacon in der Beacon Region aus. Daraus ergibt sich eine Periodendauer von $33,3\bar{3}$ ms bei einer Netzfrequenz von 60 Hz bzw. 40 ms bei 50 Hz. Durch den Beacon synchronisiert der CCo das Netz und sendet gleichzeitig Managementinformationen aus. Es ist möglich, in einem physikalischen Netz mehrere logische PLC-Netze zu betreiben. In diesem Fall wird jedes logische Netz von einem CCo verwaltet. Jeder CCo sendet für sein Netz einen Beacon in der Beacon Region. In Abbildung 4.1 ist ebenfalls zu sehen, dass zwischen den Beacon Regionen zwei Medienzugriffsverfahren definiert sind. Das erste Verfahren ist Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), das zweite Zugriffsverfahren ist das optionale TDMA. HomePlug Green PHY verwendet ausschließlich CSMA/CA. In einem Beacon ist unter anderem die Information enthalten, wann die CSMA bzw. TDMA Regionen beginnen bzw. von welchen Stationen die TDMA-Slots genutzt werden dürfen. Ein Beacon wird in einem PB136 unter Verwendung des Mini-ROBO Modes übertragen (siehe Tabelle 4.2).

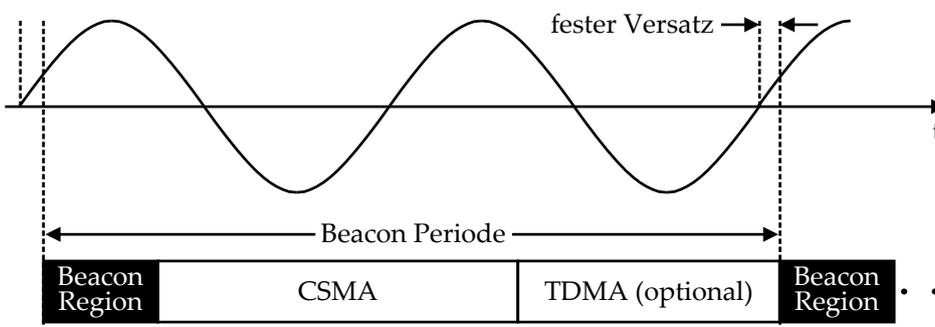


Abbildung 4.1: HomePlug Beacon Periode in Abhängigkeit der Netzfrequenz

Beim obligatorischen CSMA/CA wird ein Backoffverfahren mit Contention Window eingesetzt, das vergleichbar zu IEEE 802.11 [IEE12c] arbeitet. Um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zu reduzieren, wartet eine Station vor einem Sendeversuch eine zufällige Anzahl an Slots im Contention Window ab. In jedem Slot wird überprüft, ob der Kanal frei ist. Wird der Kanal als belegt erkannt, pausiert eine Station den Backoff für die Dauer der Belegung. Wird der Kanal wieder als frei erkannt, wird der Backoff fortgesetzt. Auf Stromleitungen, wie auch auf einem drahtlosen Kanal, können Kollisionen nicht einfach durch Mithören des eigenen Sendesignals erkannt werden, da der Sendepiegel in der Regel deutlich höher als ein mögliches Empfangssignal ist. Aus diesem Grund werden Frames, die erfolgreich empfangen wurden, vom Empfänger mit einem Acknowledgment (ACK) bestätigt. Zusätzlich zum Backoffverfahren definiert der HomePlug Standard die vier Zugriffsprioritäten CA0-CA3 (Channel Access Priority, CAP). Zur Identifizierung der aktuell höchsten Frame-Priorität im gesamten Netz werden die beiden Prioritätsauflösungsslots (Priority Resolution Slots) PRS0 und PRS1 verwendet (siehe Abbildung 4.2).

Hat eine Station einen oder mehrere Frames zu senden, wird zunächst die Prioritätsauflösung (Priority Resolution, PR) durchgeführt, um die höchste Frame-Priorität zu identifizieren. Die Station sendet in den Prioritätsauflösungsslots entsprechend der

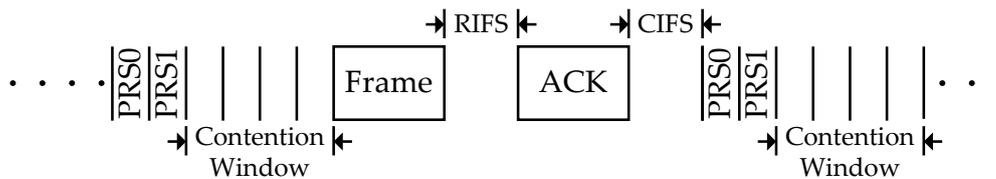


Abbildung 4.2: HomePlug CSMA/CA Medienzugriff

Frame-Priorität entweder ein PR-Symbol oder sie überwacht den Kanal auf PR-Symbole, die von anderen Stationen ausgesendet werden. In Tabelle 4.4 ist angegeben, für welche Priorität in welchen PR-Slots PR-Symbole ausgesendet werden. Für die höchste Priorität (CA3) werden PR-Symbole in beiden Prioritätsauflösungsslots gesendet. Für die niedrigste Priorität (CA0) dagegen werden keine PR-Symbole ausgesendet. Das bedeutet, dass eine Station mit einem Frame der höchsten Priorität nach der Prioritätsauflösung stets einen Backoff startet. Eine Station mit einem Frame der niedrigsten Priorität dagegen darf einen Backoff nur dann starten, wenn sie in beiden Prioritätsauflösungsslots keine PR-Symbole auf dem Kanal erkannt hat. Eine Station mit einem Frame der Priorität CA1 sendet in PRS1 nur dann ein PR-Symbol, wenn in PRS0 kein PR-Symbol erkannt wurde.

Tabelle 4.4: HomePlug PR-Symbole in Abhängigkeit der Priorität

Priorität	PRS0	PRS1
CA3	1	1
CA2	1	0
CA1	0	1
CA0	0	0

In der Literatur wird der Mechanismus, welcher der Prioritätsauflösung zugrunde liegt, als Binary Countdown [TW11] bezeichnet. In [YYH03] wird das BROADEN MAC Protokoll für Wireless Ad-Hoc Netze vorgestellt, mit dem Kollisionen durch einen Binary Countdown vermieden werden. In [HH10] wird ein weiteres Protokoll auf der Basis des Binary Countdowns dargelegt, das Kollisionen bei der drahtlosen Kommunikation zwischen Fahrzeugen in Intelligenten Transportnetzen (Intelligent Transportation Systems, ITS) vermeidet.

Nach der Prioritätsauflösung kennt jede Station im Netz die aktuell höchste Frame-Priorität. Nur Stationen mit Frames dieser Priorität konkurrieren im Anschluss um den Kanalzugriff. Im Folgenden wird der Backoff-Mechanismus genauer erläutert. Alle Stationen, die die Prioritätsauflösung gewonnen haben, dürfen einen Backoff starten. Dazu wählen sie einen zufälligen Wert zwischen Null und dem aktuellen Contention Window (CW) aus. Der ausgewählte Wert gibt an, wie viele Slots eine Station abwarten muss, bevor sie auf den Kanal zugreift. Der Mechanismus wird als CSMA with Collision Avoidance (CSMA/CA) bezeichnet, da durch die zufällige Wartezeit die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen reduziert wird. Eine Kollision tritt nur auf, wenn zwei Stationen gleichzeitig auf den Kanal zugreifen. Wird der Backoff gestartet,

wird ein zusätzlicher Zähler initialisiert. Der Backoff Procedure Event Counter (BPC) wird zunächst auf den Wert Null gesetzt. Erkennt eine Station während sie den Backoff herunterzählt, dass der Kanal belegt ist, pausiert sie den aktuellen Backoff. Er wird erst fortgesetzt, wenn der Kanal für eine ausreichende Dauer als frei erkannt wurde. Diese Dauer wird als Contention Interframe Space (CIFS) bezeichnet. Zusätzlich wird vor dem Fortsetzen des Backoffs erneut eine Prioritätsauflösung durchgeführt. Eine Besonderheit im Backoff-Verfahren ist der sogenannte Deferral Counter (DC). Dieser gibt an, wie oft eine Station im Backoff unterbrochen werden darf. Erreicht dieser den Wert Null, so erhöht die Station den BPC und würfelt einen neuen Backoff-Wert mit vergrößertem Contention Window aus (siehe Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: HomePlug CSMA/CA: CW und DC in Abhängigkeit des BPC

BPC	Prioritäten CA0 & CA1		Prioritäten CA2 & CA3	
0	CW=7	DC=0	CW=7	DC=0
1	CW=15	DC=1	CW=15	DC=1
2	CW=31	DC=3	CW=15	DC=3
>2	CW=63	DC=15	CW=31	DC=15

Wird ein neuer Backoff gestartet, wird der Backoff Procedure Counter zunächst mit dem Wert Null initialisiert. Anschließend wird das Contention Window und der Deferral Counter basierend auf Tabelle 4.5 gesetzt und der BPC inkrementiert. Der Backoff Counter (BC) wird im Anschluss gleichverteilt aus dem Intervall $[0, CW]$ ausgewählt und nach jedem freien Slot dekrementiert. Ist der Backoff Counter bei Null angelangt, überträgt eine Station ihren Frame und setzt im Anschluss den BPC auf den Wert Null zurück. Der erfolgreiche Empfang wird vom Empfänger mit einem Acknowledgment bestätigt. Ist eine Kollision oder ein anderer Fehler beim Empfang aufgetreten, erkennt der Sender den fehlgeschlagenen Versuch am Ausbleiben des Acknowledgments. In diesem Fall überträgt der Sender den Frame erneut. Wie oft eine Station einen Frame nach fehlgeschlagenen Sendeversuchen erneut aussendet, ist über ein Retry Limit definiert. Ist dieser Wert erreicht, wird der Frame verworfen. Bei jedem erneuten Sendeversuch wählt der Sender neue Werte für CW und DC basierend auf Tabelle 4.5 aus und inkrementiert im Anschluss den BPC.

Bisher folgt die Backoffprozedur weitgehend dem aus dem IEEE 802.11 Standard bekannten Backoffverfahren. Als Unterschied ist der Deferral Counter zu erwähnen. Erkennt eine Station mit laufendem Backoff in einem der Slots den Kanal als belegt, pausiert sie ihren Backoff und friert die Counter ein. Wird der Kanal anschließend für die Dauer eines CIFS als frei erkannt, erfolgt eine neue Prioritätsauflösung. Falls die Station weiterhin die höchste Frame-Priorität im Netz besitzt, kann der Backoff in Abhängigkeit des DC fortgesetzt werden. Ist DC größer als Null, werden DC und BC dekrementiert und der Backoff fortgesetzt. Falls DC jedoch Null ist, werden neue Werte für CW und DC basierend auf Tabelle 4.5 ausgewählt, der BPC inkrementiert, ein neuer Wert für BC aus dem Intervall $[0, CW]$ ausgewählt und der Backoff fortgesetzt. Der Deferral Counter wird also verwendet, um den Backoff bei hoher Auslastung des Kanals zu verlängern. Wird eine Station oft im Backoff unterbrochen, ist

davon auszugehen, dass die Kanalnutzung hoch ist. Ein verlängerter Backoff hilft, die Kollisionswahrscheinlichkeit zu reduzieren.

In Abbildung 4.3 sind die wichtigsten Interframe Spaces der Beacon Region sowie der CSMA-Region dargestellt. Die Region, die als *Reserviert* markiert ist, kann beispielsweise durch andere PLC-Netze oder durch TDMA genutzt werden. Die Beacons in der Beacon Region sind jeweils durch einen Beacon-to-beacon Interframe Space (B2BIFS) voneinander separiert. Die Dauer zwischen Frame und Acknowledgment entspricht dem Response Interframe Space (RIFS). Bevor nach einer Übertragung eine neue Prioritätsauflösung begonnen werden kann, ist für die Dauer eines Contention Interframe Spaces zu warten. Außerdem muss der Kanal zwischen dem letzten Acknowledgment in der CSMA-Region und der nächsten Beacon Region für die Dauer eines Allocation Interframe Spaces (AIFS) frei sein. Diese Abschnitte sind für interne Verarbeitungsschritte nötig. Ein Beispiel ist das Umschalten des Transceivers zwischen Senden und Empfangen.

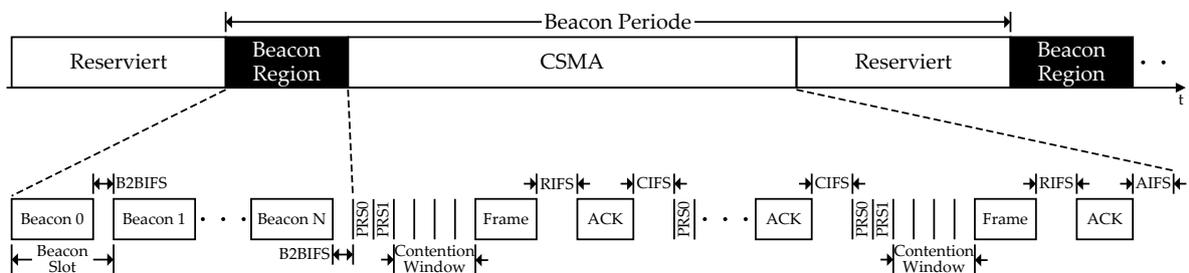


Abbildung 4.3: HomePlug Interframe Spaces für Beacon und CSMA Region

Im Folgenden wird beschrieben, wie ein MAC Frame übertragen wird. In Abbildung 4.4 ist ein Beispiel für die Verwendung des PHY Blocks mit 136 Byte (PB136) dargestellt. Eine MAC Protocol Data Unit (MPDU) besteht aus einem 2 Byte MAC Header, der MAC Service Data Unit (MSDU) und einer 4 Byte Prüfsumme (MAC Integrity Check Value). Der PHY Block besteht aus einem 4 Byte PB Header, dem PB Body, in dem die MPDU transportiert wird, und ebenfalls einer 4 Byte Prüfsumme (PB Check Sequence). Bei Verwendung eines PB136 mit 136 Byte Gesamtlänge ergibt sich ein PB Body von 128 Byte. Daraus wiederum ergibt sich eine MSDU von 122 Byte. Der Aufbau einer Physical Protocol Data Unit (PPDU) ist ebenfalls in Abbildung 4.4 dargestellt. Eine PPDU entspricht einem Frame in Abbildung 4.3. Zunächst wird eine Präambel gefolgt von der Frame Control (FC) übertragen. Im Anschluss werden die OFDM-Datensymbole (D_1 bis D_x) übertragen. Die Anzahl der benötigten OFDM-Datensymbole kann über die Größe des PHY Blocks und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Träger bestimmt werden.

Mit Hilfe der Präambel wird eine Schätzung des Kanals vor dem Empfang der Frame Control und der Datensymbole durchgeführt. Die Frame Control hat eine Länge von 128 Bit und wird entweder in einem oder zwei OFDM-Symbolen übertragen. Zwei OFDM-Symbole werden verwendet, falls eine hohe Anzahl an Trägern maskiert ist. Die Frame Control wird mit einer höheren Redundanz ausgesendet, wodurch sich

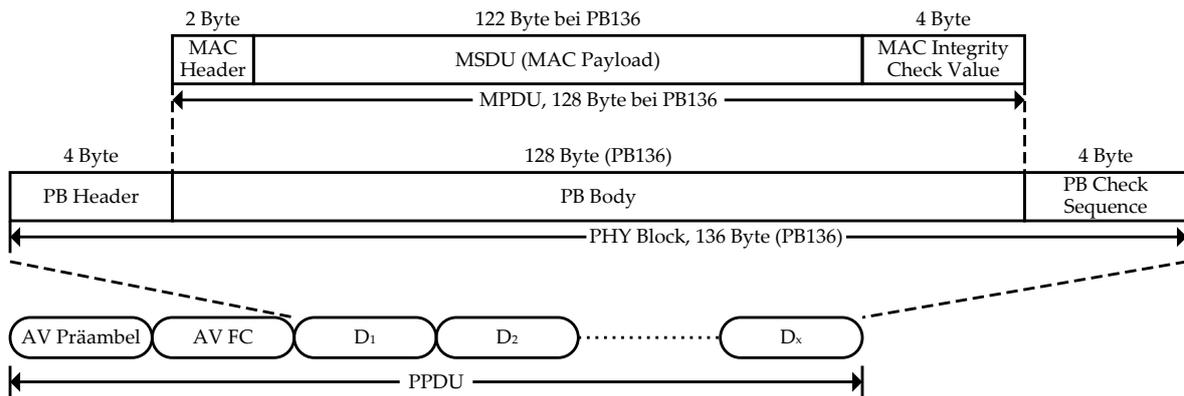


Abbildung 4.4: HomePlug PPDU-Aufbau bei Verwendung des PB136

die Zuverlässigkeit der Dekodierung erhöht. Durch den Diversity Copier wird jedes Bit der Frame Control bei Verwendung einer Tone Mask mit 917 Trägern mindestens sieben Mal ausgesendet. Aufgabe der Frame Control ist unter anderem die Identifizierung des Frame-Typs. Beispiele hierfür sind Beacon, Daten-Frame oder Acknowledgment. Folgen auf die Frame Control keine weiteren Daten, ist im Standard von der Short MPDU die Rede. Ein Acknowledgment ist ein Beispiel für eine solche Short MPDU. Folgen der Frame Control weitere Daten, wird dies als Long MPDU bezeichnet.

4.2.2 ITU-T G.hn

Die ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) startete 2006 das G.hn Projekt [OG09]. Ziel war ein Standard zur Übertragung der Daten mit bis zu 1 Gbit/s auf unterschiedlichen Leitungstypen. Im Oktober 2009 wurde die ITU-T Recommendation G.9960 [IT10b] verabschiedet. G.9960 beschreibt die physikalische Schicht und die Architektur von G.hn. Die Data Link Layer ist in der Recommendation G.9661 [IT10a] beschrieben, die im Juni 2010 verabschiedet wurde. G.hn ermöglicht die Übertragung von Daten auf verschiedenen Leitungstypen, die bereits in vielen Häusern vorhanden sind. Diese Leitungstypen sind: Telefonkabel, Koaxialkabel sowie Stromleitungen. Daher ist G.hn mehr als ein reiner PLC-Standard. Jedoch ist nach aktuellem Stand davon auszugehen, dass G.hn überwiegend auf Stromleitungen zum Einsatz kommt. Laut [Hom12] liegt die maximale PHY-Datenrate auf Stromleitungen bei 959,12 Mbit/s unter Verwendung eines Frequenzbandes von 2-100 MHz.

Auf der physikalischen Schicht nutzt G.hn OFDM. Parameter wie die Anzahl an Trägern und Abstand der Träger sind abhängig vom verwendeten Leitungstyp. Weiterhin wird eine Vorwärtsfehlerkorrektur eingesetzt. Für die Powerline-Kommunikation sind drei Frequenzbänder definiert. Das erste nutzt Frequenzen von 0-50 MHz und verwendet dabei 2048 Träger. Mit dem zweiten Band arbeitet G.hn im Frequenzband

von 0-100 MHz mit 4096 Trägern. Die beiden Bänder im Basisband nutzen einen Trägerabstand von 24,4140625 kHz. Das dritte Band ist von 100-200 MHz definiert und verwendet 1024 Träger mit einem Trägerabstand von 97,65625 kHz.

Im Dezember 2011 verabschiedete die ITU-T die MIMO Erweiterung G.9963 [IT11], welche auch als G.hn-mimo bekannt ist. Wie auch bei HomePlug AV2 werden aus drei Leitungen zwei virtuelle Leitungspaare gebildet. Falls nur zwei Leitungen vorhanden sind, kann die MIMO-Erweiterung ihre Vorteile nicht ausspielen. Laut [Hom12] verdoppelt sich bei Verwendung von MIMO die maximale Datenrate auf der physikalischen Schicht auf 1918,23 Mbit/s.

MAC-Schicht

G.hn unterstützt bis zu 250 Knoten in einem Netz. Ein solches Netz besteht aus einer oder mehreren Domänen. Eine Domäne zeichnet sich dadurch aus, dass alle Knoten innerhalb einer Domäne direkt miteinander kommunizieren können. Ein Knoten arbeitet als Domänen-Master (DM), der eine Vielzahl von Aufgaben erfüllt, wie z.B. die Zugangskontrolle zur Domäne oder auch die Reservierung von Datenraten. Weiterhin kann der DM Interferenzen zwischen Knoten einer Domäne durch die Koordination der Übertragungszeiten vermeiden.

Für den Medienzugriff ist die Zeit in MAC-Zyklen unterteilt, die auf die Netzfrequenz synchronisiert sind (siehe Abbildung 4.5). Der Versatz Δ zwischen dem positiven Nulldurchgang und dem Start eines MAC-Zyklus ist frei wählbar und darf auch Null betragen. Ein MAC-Zyklus ist in mindestens zwei Zeitintervalle unterteilt. Mindestens ein Zeitintervall ist dem Domänen-Master für die Verwaltung der Domäne zugeteilt, um den Medium Access Plan (MAP) zu übertragen. Den anderen Zeitintervallen sind Transmission Opportunities (TXOPs) zugeteilt. Der MAP enthält die Grenzen des MAC-Zyklus und beinhaltet die Liste der zugeteilten TXOPs für einen oder mehrere folgende MAC-Zyklen. Der MAP in Zyklus N enthält mindestens die Informationen der TXOPs für den Zyklus N+1. Der DM teilt die TXOPs einzelnen Stationen im Netz zu, die Daten übertragen möchten.

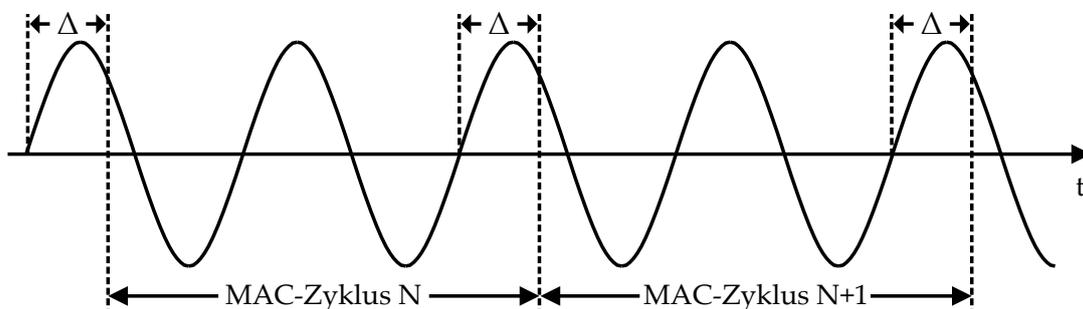


Abbildung 4.5: G.hn MAC-Zyklen in Abhängigkeit der Netzfrequenz

Um unterschiedliche Anwendungsfelder zu bedienen, sind verschiedene Typen von TXOPs definiert:

- Contention-free TXOP (CFTXOP)
- Shared TXOP (STXOP)

Contention-free TXOP: In einer CFTXOP erfolgt der Medienzugriff mittels TDMA. Eine CFTXOP ist entweder einer einzelnen Station und minimaler Benutzerpriorität zugeordnet, einer Datenverbindung, die von einer bestimmten Quellstation ausgeht, oder einer Kombination aus Quell- und Zielknoten mit minimaler Benutzerpriorität. Der Medium Access Plan wird ebenfalls in einer CFTXOP übertragen.

Shared TXOP: Eine STXOP ist in einen oder mehrere Time Slots (TS) unterteilt. Ein TS ist jeweils einer oder mehreren Stationen zugeordnet, die in diesem Slot eine Übertragung starten dürfen. Wie eine Station auf einen TS zugreift, hängt vom Typ des TS ab. Zwei Typen sind definiert:

- Contention-free Time Slot (CFTS)
- Contention-based Time Slot (CBTS)

Eine STXOP kann entweder nur CFTSs, nur CBTSs oder beide Arten enthalten. Eine STXOP, die nur aus CBTSs besteht, wird auch als CBTXOP bezeichnet. Die Zuordnung der TS zu Stationen oder Datenverbindungen ist identisch zu den Contention-free TXOPs. Ein CFTS kann jeweils exklusiv von einer ihr zugeordneten Station genutzt werden. Wird ein CFTS genutzt, verschieben sich die nachfolgenden TS entsprechend. Der Medienzugriff in den CFTSs ist vergleichbar mit den Minislots im dynamischen Segment von FlexRay.

Ein CBTS ist einer Gruppe von Stationen sowie minimaler Benutzerpriorität zugeordnet. Stationen dürfen einen ihnen zugeordneten CBTS nur für MPDUs nutzen, deren Priorität größer oder gleich der Benutzerpriorität ist. Der Zugriff innerhalb des CBTS erfolgt mittels CSMA/CA mit Backoff und Contention Window. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, wie auch im HomePlug Standard, vor dem Contention Window die höchste Frame-Priorität aufzulösen. Im Vergleich zur HomePlug Prioritätsauflösung ist bei G.hn zusätzlich ein INUSE Slot vor den beiden Prioritätsauflösungsslots definiert. Stationen, die in dem entsprechenden CBTS auf den Kanal zugreifen möchten, kündigen dies durch ein Signal im INUSE Slot an. Die Backoffprozedur ist ähnlich zum HomePlug Standard und wird an dieser Stelle nicht näher erläutert.

Zusätzlich gibt es noch einen Registration Contention-based Time Slot (RCBTS), der ausschließlich für die Registrierung der Stationen verwendet wird. Die Registrierung von Stationen ist jedoch nicht exklusiv auf RCBTSs beschränkt, sondern kann auch in CBTSs erfolgen.

4.2.3 HD-PLC

Im September 2007 wurde die HD-PLC Alliance [HDP15] von Panasonic gegründet, welche den HD-PLC Standard veröffentlichte [IEE12a]. Die physikalische Schicht nutzt im Frequenzband von 2-28 MHz Wavelet OFDM mit einer Pulsamplitudenmodulation mit einem bis fünf Bit (2-PAM bis 32-PAM). Wavelet-OFDM ist ein proprietäres Verfahren von Panasonic. Ein Vorteil von Wavelet OFDM ist, dass im Gegensatz zu Fast Fourier Transform OFDM kein Guard Intervall benötigt wird. Die maximale Datenrate auf der physikalischen Schicht ist mit 240 Mbit/s angegeben. Für die Fehlerkorrektur wird ein Reed-Solomon Code mit einem Viterbi Faltungscode oder ein Low Density Parity Check - Convolutional Code (LDPC-CC) eingesetzt.

Die MAC-Schicht wurde mit Fokus auf AV Übertragungen entwickelt und stellt Funktionen zur Unterstützung von Quality of Service (QoS), zur Abschätzung des Übertragungskanals und zur Verbesserung der Übertragungseffizienz bereit. HD-PLC definiert einen HD-PLC Master, der Beacons in einem vordefinierten Intervall aussendet. Zwischen den Beacons erfolgt der Zugriff entweder in der Contention-free Period (CFP) oder in der Contention Period (CP) (siehe Abbildung 4.6). Die CFP wird für Übertragungen von Stationen genutzt, die eine reservierte Datenrate benötigen, wofür TDMA verwendet wird. In der CP wird CSMA/CA als Medienzugriff verwendet. HD-PLC definiert 16 Prioritätslevel, von denen acht vom Benutzer selbst definiert werden können.

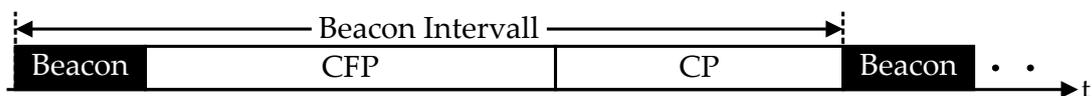


Abbildung 4.6: HD-PLC Beacon Intervall

Um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zu reduzieren, sind drei Mechanismen definiert. Neben dem bereits bekannten CSMA/CA gibt es eine Prioritätssteuerung (Priority Control). Für die Prioritätssteuerung wird die Zeit vor einer möglichen Frameübertragung in zwei Abschnitte unterteilt. In Abbildung 4.7 ist die Contention Periode mit der Unterteilung in einen GAP und einen CONTENTION Zeitabschnitt dargestellt. Im GAP Zeitabschnitt dürfen niedrigere Benutzerprioritäten nicht auf den Kanal zugreifen. Dadurch wird sichergestellt, dass die höheren beiden Benutzerprioritäten (Priorität 6 und 7) Vorrang haben. Ist eine Benutzerpriorität 7 vorhanden, hat diese wiederum Vorrang vor der Priorität 6, was durch GAP-Abschnitte mit unterschiedlicher Dauer realisiert ist.

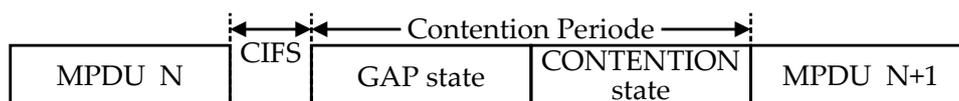


Abbildung 4.7: HD-PLC Contention Periode

Der dritte Mechanismus zur Reduzierung der Anzahl an Kollisionen wird Dynamic Virtual Token Passing (DVTP) genannt. Wird DVTP in einer CP verwendet, wird die CSMA/CA Prioritätssteuerung nicht verwendet. Über Virtual Token Slots zirkuliert das Senderecht. Nutzt eine Station ihren Slot, verschieben sich die Sendemöglichkeiten der anderen Stationen nach hinten.

Um die Effizienz der Übertragung zu erhöhen, verwendet HD-PLC eine Frameaggregation. Dazu wird nach Präambel und Header ein Container-Block übertragen, der wiederum bis zu 60 Segment-Blöcke enthalten kann. Jedes Segment kann bis zu 31 aggregierte MSDUs enthalten. Die einzelnen Segmente werden mit Acknowledgments und Negative Acknowledgments „bestätigt“. Dadurch müssen bei Übertragungsfehlern nur die fehlerhaften Segmente erneut übertragen werden.

4.2.4 IEEE 1901

Die IEEE P1901 Working Group startete 2005 ihre Arbeit an einem Standard für eine Breitbandübertragung auf Powerline-Netzen, der im Dezember 2010 veröffentlicht wurde [IEE10]. Ziel des IEEE 1901 Standards ist die Vereinheitlichung unterschiedlicher bestehender PLC-Standards für Datenraten über 100 Mbit/s und Frequenzen unter 100 MHz. Als Grundlage dienen unter anderem die zuvor vorgestellten Standards HomePlug AV und HD-PLC. Als Resultat beinhaltet der Standard physikalische Schichten basierend auf FFT-OFDM sowie Wavelet-OFDM [RHL⁺11]. FFT PHY ist vom HomePlug AV Standard abgeleitet, während Wavelet PHY von HD-PLC abstammt. Jede der physikalischen Schichten ist optional, wobei auch beide PHYs gleichzeitig vorhanden sein können.

IEEE 1901 und ITU-T G.cx (G.9972) spezifizieren denselben Koexistenz-Modus, der als Inter-System Protocol (ISP) bezeichnet wird. Zunächst wurde das Inter-PHY Protocol (IPP) [GKO09] definiert, das die Koexistenz der physikalischen Schicht regelt. Dies ist nötig, da IEEE 1901 zwei physikalische Schichten definiert, die nicht kompatibel sind. Als IPP um Koexistenz-Mechanismen für G.hn erweitert wurde, erfolgte die Umbenennung in ISP.

Neben dem Breitband-Standard IEEE 1901 wurde im Dezember 2013 der IEEE 1901.2 Standard [IEE13] als schmalbandige Variante für Smart Grid Anwendungen veröffentlicht. Der Standard bietet Datenraten von bis zu 500 kbit/s und nutzt Frequenzen unter 500 kHz.

4.2.5 Fazit

Die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Standards weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Auf der physikalischen Schicht wird OFDM eingesetzt, wodurch mit frequenzselektiven Störungen durch die Maskierung von Trägern umgegangen

werden kann. Als Medienzugriff kommt CSMA, TDMA oder eine Kombination beider Mechanismen zum Einsatz.

Für den Einsatz im Fahrzeug spielen die Kosten der Hardware eine wichtige Rolle. Die Hardware des HomePlug Green PHY Standards ist im Vergleich zum übergeordneten HomePlug AV Standard vereinfacht, wodurch sich die Stückkosten reduzieren. Weiterhin ist die Robustheit der Kommunikation bei Verwendung des Green PHY Standards durch die redundante Aussendung der Daten erhöht. Aus diesen Gründen wird der HomePlug Green PHY Standard im nächsten Kapitel auf seine Eignung für den Einsatz im Fahrzeug untersucht.

4.3 Auswirkungen auf die Topologie

Die Verwendung der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug eröffnet neue Möglichkeiten, da alle PLC-Knoten im Fahrzeug direkt miteinander kommunizieren können. Ein Gateway ist nur nötig, wenn auch mit anderen Bussystemen kommuniziert werden soll. Dies kann zunächst als Vorteil gesehen werden. Der Aufwand für die Absicherung wird jedoch erhöht, da stets das gesamte PLC-System betrachtet werden muss. Der Planungsaufwand für die Datenleitungen im Kabelbaum wird jedoch deutlich reduziert, da für PLC nur die ohnehin nötige Anbindung an das Energiebordnetz benötigt wird.

PLC-Knoten sind im Fahrzeug dauerhaft mit den Energieversorgungsleitungen verbunden und werden mit Strom versorgt, sobald die entsprechende Klemme geschaltet ist. Gibt es Knoten, die auch bei geparktem Fahrzeug aktiv sein sollen, so muss auch der CCo aktiv sein, um die Beacons auszusenden. Knoten, die in diesem Zustand kommunizieren möchten, müssen stets auf die Beacons synchronisiert sein. Alle Knoten, die in anderen Zuständen über die Klemmen eingeschaltet werden, sind schnellstmöglich auf die Beacons zu synchronisieren, um an der Kommunikation teilnehmen zu können.

Erfolgt der Medienzugriff mittels CSMA, müssen alle Knoten, die potentielle Empfänger von Botschaften darstellen, dauerhaft aktiv sein. Bei TDMA sind die Knoten dagegen nur in den Slots aktiv, in denen für sie relevante Botschaften ausgesendet werden.

4.4 Anforderungen an ein automotive PLC-Protokoll

In diesem Abschnitt erfolgt eine Konkretisierung der Kommunikationsanforderungen aus Abschnitt 2.5. Im Folgenden werden die Anforderungen zusammengefasst, die an ein PLC-System für den Einsatz im Fahrzeug gestellt werden. Der Schwerpunkt liegt auf Anforderungen, die ein Ersatz der LIN-Verkabelung erfüllen sollte.

Skalierbarkeit: Wird ein aktuelles Fahrzeug betrachtet, kann eine hohe Anzahl an LIN-Segmenten identifiziert werden. In Fahrzeugen der Oberklasse sind bereits heute bei Vollkonfiguration bis zu 20-30 LIN-Busse verbaut. Einige dieser Segmente bestehen ausschließlich aus einer 1:1 Kommunikationsbeziehung. Dies bedeutet, dass ein LIN-Bus lediglich zur Kommunikation zwischen zwei Steuergeräten verwendet wird. Weiterhin sind viele Komfort-Funktionen über LIN-Busse realisiert. Da die Anzahl an Komfort-Funktionen rasch mit den Fahrzeuggenerationen ansteigt, ist auch in Zukunft mit einer deutlichen Zunahme an LIN-Bussen im Fahrzeug zu rechnen. Bereits heute enthält ein Oberklasse-Fahrzeug bis zu 100 LIN-Knoten. Ein PLC-System muss daher eine hohe Anzahl an Knoten (deutlich über 100) unterstützen.

Unterstützung für ereignisbasierten Verkehr: Viele der LIN-Knoten haben nur selten Kommunikationsbedarf. Beispiele sind Schalter für den Fensterheber oder die Klimaanlage. Da der Großteil der Kommunikation ereignisbasiert ist, muss ein PLC-Protokoll für die Kommunikation im Fahrzeug besonders auf diese Verkehrscharakteristik ausgelegt sein.

Quality of Service: Einige Funktionen haben QoS Anforderungen bezüglich der maximal tolerierbaren Verzögerung. Besonders wenn der Bediener eine direkte Rückmeldung des Systems erwartet, wie beispielsweise bei der Bedienung des Fensterhebers oder der Einstellung der Außenspiegel, darf die Verzögerung einen Grenzwert nicht überschreiten. Hochprioritäre Botschaften sind daher bevorzugt im Netz zu übertragen.

Niedriger Energieverbrauch: Werden bestehende Bussysteme durch ein neues System ersetzt, sollten die Vorteile des neuen Systems die evtl. vorhandenen Schwächen überwiegen. Idealerweise sollte das neue System einen vergleichbaren oder sogar niedrigeren Energieverbrauch aufweisen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein PLC-Transceiver einen höheren Energieverbrauch als beispielsweise ein LIN-Transceiver aufweist. Aus diesem Grund ist die Energieeffizienz schichtenübergreifend zu berücksichtigen. In Kapitel 6 wird eine Abschätzung des Energieverbrauchs des in Kapitel 5 vorgeschlagenen Protokolls gegeben. Weiterhin werden Modifikationen vorgestellt, um den Energieverbrauch durch Maßnahmen auf der MAC-Schicht zu reduzieren.

Niedrige Kosten: Die LIN-Busse, die in einem ersten Schritt durch ein PLC-System ersetzt werden sollen, weisen vergleichsweise geringe Kosten auf, da die Hardware der LIN-Transceiver nur eine geringe Komplexität besitzt. Um die Kosten niedrig zu halten, ist die Verwendung von Standardkomponenten das Ziel. Im Idealfall sind an verfügbarer Hardware keine oder nur geringe Modifikationen nötig. Vorteilhaft ist, wenn verfügbare Lösungen größtenteils in Firmware realisiert sind, damit evtl. nötige Anpassungen für den Einsatz im Fahrzeug mit geringem Aufwand machbar sind.

Die verfügbaren PLC-Lösungen können in Bezug auf diese Anforderungen geprüft werden. Im Gegensatz zur Heimvernetzung ist für den automobilen Einsatz nicht die

maximale Datenrate das vorrangige Ziel. Stattdessen ist eine zuverlässige Kommunikation bei geringer Hardwarekomplexität erstrebenswert, um die Kosten zu minimieren. Durch die im Vergleich zu HomePlug AV vereinfachte Hardware des HomePlug Green PHY Standards stellt dieser eine geeignete Grundlage für die Kommunikation im Fahrzeug dar. Modifikationen, die für den automobilen Einsatz getroffen werden, können auch für Smart Grid Anwendungen von Vorteil sein. Erstrebenswert ist eine Lösung, die für beide Anwendungsbereiche optimiert ist, damit die Stückzahlen erhöht und die Kosten reduziert werden.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Einführung in die Powerline-Kommunikation gegeben und weit verbreitete Standards erläutert. Neben Eigenschaften der physikalischen Schicht wurden die Mechanismen des Medienzugriffs behandelt. Die Standards weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Auf der physikalischen Schicht kann mit frequenzselektiven Störungen durch die Maskierung von Trägern oder durch redundantes Aussenden der Informationsblöcke umgegangen werden. Auf der MAC-Schicht kommt CSMA, TDMA oder eine Kombination beider Mechanismen zum Einsatz.

Vielversprechend ist die Hardware des HomePlug Green PHY Standards, der vom HomePlug AV Standard abgeleitet ist und eine kostengünstige und robuste Kommunikation für Smart Grid Anwendungen bereitstellt. Aus diesem Grund wird der HomePlug Green PHY Standard im folgenden Kapitel auf seine Eignung für den Einsatz im Fahrzeug untersucht. Weiterhin werden Modifikationen vorgeschlagen, um das Protokoll für die Kommunikation im Fahrzeug zu optimieren. Dabei wird darauf geachtet, dass die Modifikationen weitestgehend auf dem Standard basieren und daher mit vertretbarem Aufwand realisierbar sind.

5 CarPlug Green PHY

In diesem Kapitel wird betrachtet, inwieweit sich der HomePlug Standard zur Vernetzung in Fahrzeugen eignet. Wie der Begriff **CarPlug** im Titel dieses Kapitels bereits andeutet, ist das Ziel, den HomePlug Standard mit wenigen Modifikationen auch für die Kommunikation in Fahrzeugen einzusetzen. Die Untersuchungen basieren weitgehend auf dem HomePlug Green PHY Standard, durch dessen vereinfachte Hardware die Kosten reduziert werden können. Nach einer ersten Analyse des Standards werden Modifikationen vorgeschlagen und Simulationsergebnisse präsentiert. Zur Optimierung der Übertragung hinsichtlich der Kommunikationsanforderungen im Fahrzeug werden daraufhin weitere Medienzugriffsprotokolle vorgeschlagen. Diese bauen auf der physikalischen Schicht des HomePlug Green PHY Standards auf. Soweit möglich werden auch auf der MAC-Schicht bestehende Elemente beibehalten, um die nötigen Modifikationen gering zu halten.

Da durch den Gleichstrom im Fahrzeug keine Synchronisierung auf die Netzfrequenz möglich ist, sendet ein Steuergerät, das als Central Coordinator (CCo) ausgewählt wird, Beacons in einem vorgegebenen Intervall aus. In dieser Arbeit wird eine Dauer von 50 ms für die Beacon Periode angenommen. Diese Dauer stellt ein Kompromiss zwischen einem niedrigen Overhead, ausreichender Häufigkeit zur Synchronisation und einer geringen Aufstartzeit dar. Als Aufstartzeit wird die Dauer bezeichnet, die nach dem Einschalten des Systems bis zum Erreichen eines sendebereiten Zustands vergeht. Beim Aufstartvorgang ist es nötig, den Kanal für eine gewisse Dauer zu überwachen, bis ausreichend Beacons erkannt wurden. Für eine zuverlässige Synchronisation ist es notwendig, dass nach dem ersten Erkennen eines Beacons mindestens ein zweiter Beacon nach der Dauer einer Beacon Periode erkannt wird. Im Worst Case entspricht die Dauer zur Erkennung zweier Beacons der doppelten Dauer einer Beacon Periode.

Eine weitere Annahme für den Einsatz im Fahrzeug ist, dass nur ein einziges PLC-Netz existiert. Daher gibt es exakt einen CCo und in der Beacon Region wird stets genau ein Beacon ausgesendet.

5.1 Eignung für den Einsatz im Fahrzeug

Zunächst wird der Green PHY Standard ohne Modifikationen betrachtet. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, nutzt HomePlug Green PHY zwischen den Beacons ausschließlich CSMA. Da davon ausgegangen wird, dass im Fahrzeug nur ein Beacon in der Beacon Region übertragen wird, werden im Folgenden die Begriffe Beacon und

Beacon Region synonym verwendet. Die Struktur einer Beacon Periode ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Der Bereich, der in Abbildung 5.1 als Beacon bezeichnet wird, entspricht einer HomePlug Beacon Periode, in der ein einzelner Beacon übertragen wird.

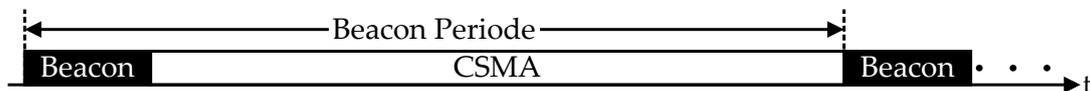


Abbildung 5.1: Beacon Periode des HomePlug Green PHY

Es existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten, Frames in der CSMA-Region zu übertragen: Mit und ohne Bestätigungen. Allerdings ist der Sender ohne Bestätigungen nicht in der Lage, Kollisionen zu erkennen. Eine zuverlässige Kommunikation ist daher nicht garantiert. Bestätigungen dagegen erhöhen den Overhead, der bei CSMA/CA im Vergleich zu anderen Zugriffsverfahren bereits relativ hoch ist. Allerdings ist eine zuverlässige Übertragung für den Großteil der Kommunikation im Fahrzeug notwendig, wodurch Bestätigungen erforderlich sind. Unicast-Botschaften können direkt vom Empfänger bestätigt werden. Bei Broadcast-Botschaften ist dies jedoch nicht möglich. Um auch bei Broadcast-Nachrichten Kollisionen zu erkennen, kann vorab für jede Broadcast-Botschaft ein Empfänger bestimmt werden, der die Bestätigung aussendet. Auf diese Weise können Kollisionen auch bei Broadcasts erkannt werden. Übertragungsfehler durch einzelne Störungen des physikalischen Kanals werden jedoch nicht zuverlässig detektiert.

Als Vorteil des reinen CSMA-Zugriffs ist zu erwähnen, dass keine zentrale Koordinierungsstelle nötig ist. Soll ein neuer Knoten oder eine neue Botschaft hinzugefügt werden, kann die Definition dezentral erfolgen. Weiterhin können Knoten innerhalb der CSMA-Region prinzipiell jederzeit direkt miteinander kommunizieren. Ein Nachteil ist das Backoff-Verfahren, das einen hohen Overhead erzeugt. Die Bestätigungen belegen ebenfalls wertvolle Übertragungszeit. Da jederzeit Nachrichten fremder Stationen eintreffen können, müssen die Stationen den Kanal dauerhaft überwachen, was sich negativ auf den Energieverbrauch auswirkt.

In Tabelle 5.1 sind die wichtigsten Parameter aus dem Standard aufgelistet. Einige Werte sind in Samples angegeben und können mit Hilfe der OFDM-Abtastrate von 75 MHz umgerechnet werden. Bei Verwendung des Green PHY Standards ist die Coderate des Turbo-Codes fest auf $\frac{1}{2}$ eingestellt. Der Turbo Convolutional Encoder erzeugt daher aus einem Informationsbit zwei codierte Bit.

Mit den angegebenen Parametern kann die Dauer der Beacon Region bestimmt werden. In Abbildung 4.3 auf Seite 57 ist zu sehen, dass in der Beacon Region auf einen Beacon stets ein B2BIFS folgt. Zunächst muss in Abhängigkeit der verfügbaren Träger bestimmt werden, wie viele OFDM-Symbole für die Übertragung des PB136 benötigt werden. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, wird der Beacon in einem PB136 mit dem Mini-ROBO Mode übertragen. Die Modulationsstufe ist bei Green PHY fest auf QPSK eingestellt, wodurch zwei Bit pro Träger übertragen werden.

Tabelle 5.1: Wichtige Parameter des HomePlug Green PHY Standards

Parameter	Wert
OFDM-Abtastrate	75 MHz
IFFT Intervall	3072 Samples
AV Präambel	10 · 384 Samples
AV Frame Control	3072 Samples
Guard Intervall (FC)	1374 Samples
Guard Intervall (Mini-ROBO, GI_{MR})	567 Samples
Beacon-to-beacon Interframe Space (B2BIFS)	90 μ s
Prioritätsauflösungs-Slot (PR-Slot)	35,84 μ s
Backoff-Slot	35,84 μ s
Response Interframe Space (RIFS_AV_default)	140 μ s
Allocation Interframe Space (AIFS)	30 μ s
Contention Interframe Space (CIFS)	100 μ s

Ein Fahrzeug stellt ein abgeschlossenes System dar. Daher wird für die Berechnungen davon ausgegangen, dass alle 1155 Träger zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, kann die Berechnung entsprechend angepasst werden.

$$\text{Bit_pro_OFDM_Symbol} = \frac{1155 \text{ Träger}}{5 \text{ Kopien} \cdot 2 \frac{\text{Bit}}{\text{Träger}} \cdot \frac{1}{2}} = 231 \quad (5.1)$$

$$\text{Anzahl_OFDM_Symbole} = \left\lceil \frac{136 \text{ Byte} \cdot 8 \frac{\text{Bit}}{\text{Byte}}}{\text{Bit_pro_OFDM_Symbol}} \right\rceil = 5 \quad (5.2)$$

Daraus lässt sich die Dauer der Übertragung eines PB136 sowie die Dauer der Beacon Region bestimmen:

$$T_{PB136} = \frac{\text{Präambel} + (GI_{FC} + FC) + 5 \cdot (GI_{MR} + \text{IFFT Intervall})}{\text{OFDM Abtastrate}} = 353,08 \mu\text{s} \quad (5.3)$$

$$T_{Beacon_Region} = T_{PB136} + \text{B2BIFS} = 443,08 \mu\text{s} \quad (5.4)$$

Da die Begriffe Beacon und Beacon Region synonym verwendet werden, gilt im Folgenden: $T_{Beacon} = T_{Beacon_Region}$.

5.1.1 LIN over Green PHY

Für einen einfachen und raschen Ersatz der LIN-Verkabelung wird zunächst untersucht, ob das bestehende LIN-Protokoll weiterhin Verwendung finden kann. Die Idee ist, den LIN-Transceiver, der in der Regel über eine UART-Schnittstelle (Universal

Asynchronous Receiver Transmitter) mit einem Mikrocontroller verbunden ist, durch einen PLC-Transceiver zu ersetzen (siehe Abbildung 5.2). Die Protokoll-Logik ist üblicherweise im Mikrocontroller realisiert. Der LIN-Transceiver übernimmt im Wesentlichen die physikalische Anbindung und Absicherung. Die UART-Schnittstelle wird mit derselben Datenrate wie der LIN-Bus betrieben. Damit kann der LIN-Transceiver die einzelnen Bit, die er entweder vom Mikrocontroller über die UART-Schnittstelle oder vom LIN-Bus empfängt, direkt weiterleiten. Dadurch ist die Verzögerung, die durch den LIN-Transceiver entsteht, minimal. Ein Vorteil dieser Realisierung ist, dass durch die Master-Slave-Kommunikation des LIN-Busses sichergestellt ist, dass stets nur ein Knoten auf den Kanal zugreift.

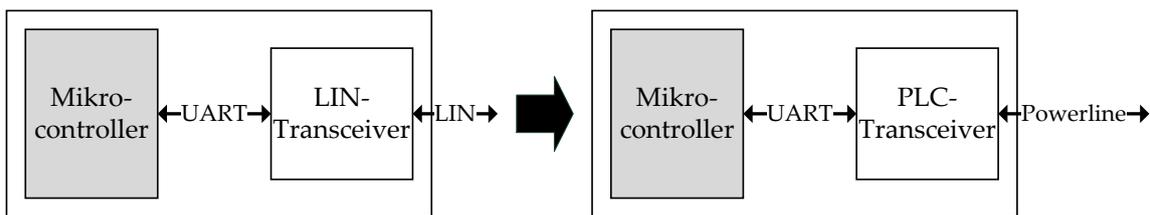


Abbildung 5.2: LIN-Knoten (links) und PLC-Knoten (rechts)

Zunächst wird die Kommunikation auf dem LIN-Bus genauer betrachtet. Laut der LIN-Spezifikation [LIN06] wird der Header (34 Bit) vom Master ausgesendet. Die LIN-Response (20-90 Bit) wird entweder vom Master oder vom Slave versandt. Weiterhin definiert die LIN-Spezifikation, dass die Dauer des LIN-Headers sowie der LIN-Response jeweils 40% länger als die nominelle Dauer sein darf. Wird der Header vom Master ausgesendet, definieren diese 40% die maximale Dauer, die vom Ende des Headers bis zum Anfang der Response vergehen darf. Abbildung 5.3 zeigt den sogenannten Response Space.

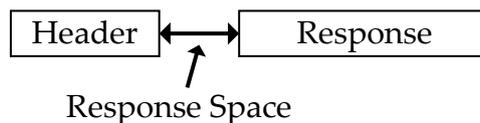


Abbildung 5.3: LIN Response Space

Wird der LIN-Transceiver durch einen PLC-Transceiver ersetzt, müssen die Daten vom Mikrocontroller zwischengespeichert werden, bevor sie über die PLC-Schnittstelle mit höherer Datenrate versendet werden. In Abbildung 5.4 ist die Nachrichtenabfolge schematisch für den Fall dargestellt, dass der Header vom Master und die Response vom Slave ausgesendet wird. Im Master wird der Header zunächst über die UART-Schnittstelle an den PLC-Transceiver übertragen. Dieser überträgt den Header im Anschluss über den PLC-Kanal. Beim Empfänger wird der Header vom PLC-Transceiver entgegengenommen und daraufhin über die UART-Schnittstelle an den Mikrocontroller des Slaves weitergegeben. Nach einer kurzen Verarbeitungszeit wird die Response dann analog zum Header vom Slave zum Master gesendet.

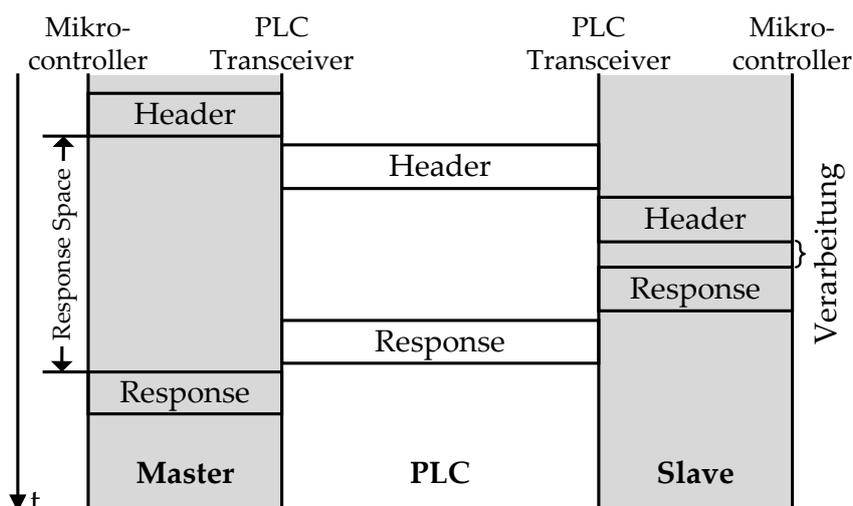


Abbildung 5.4: Nachrichtenabfolge: LIN over Green PHY

Header und Response sind jeweils kurz genug, um in einem PB136 des Green PHY Standards übertragen werden zu können. In Abbildung 5.4 ist zu erkennen, dass innerhalb der Response Space zwei weitere UART-Übertragungen im Slave stattfinden. Da die Dauer der Response Space maximal 40% der Dauer von Header und Response beträgt, ist die maximale Dauer bereits durch diese UART-Übertragungen deutlich überschritten. Hinzu kommen noch die beiden Green PHY Übertragungen sowie Verarbeitungszeiten. Daher sind Anpassungen am vorgestellten System nötig.

Laut Gleichung 5.3 beträgt die Dauer der Übertragung eines PB136 bei 1155 verfügbaren Trägern 353,08 μs . In Abbildung 5.4 ist zu sehen, dass innerhalb der Response Space zwei Green PHY Übertragungen stattfinden, die zusammen 706,16 μs in Anspruch nehmen. Die kürzeste Response Space ergibt sich, wenn die Response die minimale Länge von 20 Bit aufweist. In diesem Fall beträgt die Response Space bei einem LIN-Bus mit 19,2 kbit/s maximal:

$$T_{\text{Response_Space_max}} = 40\% \cdot \frac{(34 \text{ bit} + 20 \text{ bit})}{19,2 \text{ kbit/s}} = 1125 \mu\text{s} \quad (5.5)$$

Die beiden Green PHY Übertragungen nehmen daher bereits über 62% der maximalen Response Space in Anspruch. Aus diesem Grund werden im Folgenden Optimierungen dargelegt, mit denen die Übertragungszeiten sowohl über Green PHY als auch über die UART-Schnittstelle verkürzt werden können.

5.1.2 Optimierungsmöglichkeiten

Im vorherigen Abschnitt wurde berechnet, dass für die Übertragung eines PB136 bei 1155 verfügbaren Trägern mit dem Mini-ROBO Mode fünf OFDM-Datensymbo-

le benötigt werden. Pro OFDM-Symbol können dabei bis zu 231 Bit übertragen werden. Definiert man einen PHY Block mit 28 Byte (PB28), kann dieser in einem einzigen OFDM-Symbol übertragen werden. Ein PB28 hat eine maximale MAC Payload (MSDU) von 14 Byte. Dies ist ausreichend für den LIN-Header oder die LIN-Response mit maximaler Länge. LIN-Header und LIN-Response mit maximaler Länge sind allerdings zusammen zu lang, um in einem einzigen OFDM-Symbol übertragen zu werden. Die Übertragungsdauer eines PB28 bei fünf Kopien (Mini-ROBO Mode) beträgt 159,00 μ s. Somit kann die Dauer zweier Green PHY Übertragungen von 706,16 μ s auf 318,00 μ s verkürzt werden. Sendet der Master den Header sowie die Response aus, kann entweder ein standardkonformer PB136 verwendet werden oder es wird ein weiterer PHY Block definiert, der in zwei OFDM-Datensymbolen übertragen werden kann. Die Übertragungsdauer bei Verwendung von zwei OFDM-Datensymbolen beträgt 207,52 μ s. Alternativ zur Verkürzung der PHY Blocks kann auch die Anzahl der ausgesendeten Kopien reduziert werden, wodurch mehr Bit pro OFDM-Symbol übertragen werden können. Allerdings reduziert sich dadurch die Robustheit des Systems gegen frequenzselektive Störungen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Gesamtübertragungszeit bieten die UART-Schnittstellen. Bei vielen Mikrocontrollern kann die UART-Schnittstelle mit einer deutlich erhöhten Datenrate (z.B. 1 Mbit/s) betrieben werden. Dadurch kann der PLC-Transceiver früher mit dem Aussenden des Green PHY Frames beginnen. Die Summe der Übertragungszeiten zweier Green PHY Übertragungen sowie vierer UART-Übertragungen mit 1 Mbit/s ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Zu den UART-Übertragungen zählen zwei Header-Übertragungen sowie zwei Response-Übertragungen in Abhängigkeit der Payload-Länge.

Tabelle 5.2: LIN over Green PHY: Minimale Übertragungszeiten

Payload	140% LIN-Header (19,2 kbit/s)	140% LIN-Response (19,2 kbit/s)	Gesamte Übertragung (1 Mbit/s UART): 2 · Green PHY + 2 · UART (Header) + 2 · UART (Response)	
			PB136	PB28
1 Byte	2479,17 μ s	1458,33 μ s	814,16 μ s	426,00 μ s
2 Byte		2187,50 μ s	834,16 μ s	446,00 μ s
3 Byte		2916,67 μ s	854,16 μ s	466,00 μ s
4 Byte		3645,83 μ s	874,16 μ s	486,00 μ s
5 Byte		4375,00 μ s	894,16 μ s	506,00 μ s
6 Byte		5104,17 μ s	914,16 μ s	526,00 μ s
7 Byte		5833,33 μ s	934,16 μ s	546,00 μ s
8 Byte		6562,50 μ s	954,16 μ s	566,00 μ s

Die angegebenen Zeiten beziehen sich ausschließlich auf die reinen Übertragungszeiten der Frames. Verarbeitungszeiten sowie Prioritätsauflösungen, Backoffs oder Acknowledgments wurden bisher nicht berücksichtigt. Existiert nur ein Master im Netz, der die gesamte Kommunikation steuert, sind Prioritätsauflösung und Backoff theoretisch nicht nötig. Auch auf Acknowledgments kann verzichtet werden, da durch die

Master-Slave-Kommunikationsstruktur sichergestellt ist, dass immer nur ein Knoten auf den Kanal zugreift.

Die Analyse zeigt, dass eine Übertragung der Daten über Green PHY mit Anpassungen (mindestens der Erhöhung der UART-Datenrate) theoretisch möglich ist. Allerdings wurde bisher nur ein LIN-Bus betrachtet. Sollen mehrere LIN-Busse ersetzt werden, muss der Overhead weiter reduziert werden. Die Master-Slave-Kommunikation ist im betrachteten Fall höchst ineffizient. Die Slaves können nur kommunizieren, wenn der entsprechende Header ausgesendet wurde.

Daher werden neue Medienzugriffsprotokolle benötigt, die hinsichtlich der Kommunikationsanforderungen im Fahrzeug optimiert sind. Im folgenden Abschnitt werden weitere Modifikationen vorgestellt, deren Ziel nicht mehr die Beibehaltung des Master-Slave Medienzugriffsprotokolls des LIN-Busses ist.

5.1.3 Nutzdatenübertragung in der Frame Control

Es wurde gezeigt, dass der Overhead durch die PHY Blocks vergleichsweise hoch ist. Wie bereits im Abschnitt 4.2.1 beschrieben, definiert der HomePlug Standard neben der Long MPDU auch eine Short MPDU, bei der die PPDU nur aus Präambel und Frame Control besteht. Die Felder der Frame Control sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.3: Felder der HomePlug AV Frame Control

Feld	Oktett	Bit-Nummer	Feldgröße [Bit]
Delimiter Type	0	0-2	3
Access Field		3	1
Short Network Identifier		4-7	4
Variant Field	1-12	-	96
HomePlug AV Frame Control Block Check Sequence	13-15	-	24

Interessant ist das Variant Field, dessen Inhalt durch den Delimiter Type (DT) bestimmt wird. Die verschiedenen Delimiter-Typen sind in Tabelle 5.4 angegeben. Zwei Delimiter-Typen („110“ und „111“) sind aktuell ungenutzt. Einer dieser Delimiter-Typen kann dazu verwendet werden, die Übertragung eines automotive Frames im Variant Field anzuzeigen. Das Variant Field ist mit 96 Bit lang genug, um die maximale LIN-Payload von 8 Byte zu transportieren. Neben diesen 64 Bit Nutzdaten stehen im Variant Field noch weitere 32 Bit zur Verfügung. Diese 32 Bit können beispielsweise für die Adressierung oder andere Managementinformationen genutzt werden. Alternativ kann die maximale Nutzdatenlänge auf bis zu 12 Byte erhöht werden.

Ein Vorteil dieser Übertragungsart ist, dass die Redundanz bei Übertragung der Frame Control höher als mit den ROBO-Modes ist, was die Wahrscheinlichkeit von Übertragungsfehlern reduziert. Laut dem Green PHY Standard wird jedes Bit der

Tabelle 5.4: HomePlug AV Delimiter-Typen

DT Wert	Interpretation
000	Beacon
001	Start of Frame (SOF)
010	Selective Acknowledgment (SACK)
011	Request to Send (RTS)/Clear to Send (CTS)
100	Sound
101	Reverse Start of Frame (RSOF)
110-111	Reserved

Frame Control bereits bei der Tone Mask mit nur 917 Trägern mindestens siebenfach übertragen. Außerdem entspricht die Änderung weitgehend dem Standard, sodass die Modifikation mit geringen Hardware- oder Firmwareanpassungen realisierbar ist. Es ist lediglich ein weiterer Delimiter Type zu definieren und das Variant Field für Nutzdaten freizugeben.

Die Übertragungszeit kann durch die Übertragung der Nutzdaten in der Frame Control weiter reduziert werden:

$$T_{FC_only} = \frac{\text{Präambel} + G_{FC} + FC}{\text{OFDM Abtastrate}} = 110,48 \mu\text{s} \quad (5.6)$$

Adressierung bei Verwendung der Frame Control

Kommt das LIN-Protokoll nicht länger zum Einsatz, ist für das neue Protokoll ein Adressierungsschema nötig. Es existieren verschiedene Adressierungsarten, die verwendet werden können. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Knotenadressen (wie z.B. bei Ethernet), womit einzelne Knoten direkt angesprochen werden können. Bei Verwendung der Knotenadressierung muss ein Knoten auf einem geteilten Bus nur auf die eigene Adresse (und evtl. auf eine Broadcast-Adresse) filtern. Ein Nachteil dieser Adressierungsart ist jedoch, dass ein Typ-Feld nötig ist, um den Inhalt der Nachricht zu identifizieren sofern ein Knoten mehr als einen Nachrichtentyp versendet. Falls eine Bestätigung nötig ist, wird ein Feld für die Quelladresse im Header benötigt. Für einen Broadcast oder für Multicasts werden zusätzliche Adressen benötigt. Ein Beispiel für die Knotenadressierung in der Frame Control ist in Abbildung 5.5 dargestellt. In diesem Beispiel sind jeweils 8 Bit für Quell- und Zieladresse (DST und SRC) vorgesehen. Damit können 256 Knoten adressiert werden. Das Längen-Feld enthält die Länge der Payload in Byte und das Typ-Feld identifiziert den Inhalt der Nachricht. Das Längen-Feld kann entfallen, wenn durch den Typ allen Knoten bereits vorab bekannt ist, wie lang die Nachricht ist. In diesem Fall kann die Quell- und Zieladresse jeweils auf 10 Bit erweitert werden. Alternativ kann auch das Typ-Feld verkürzt werden.

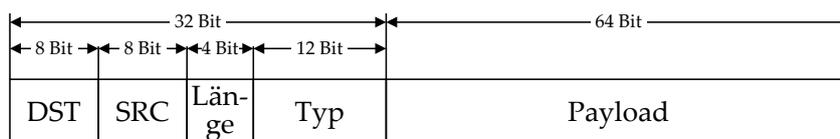


Abbildung 5.5: Beispiel der Knotenadressierung

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung der Nachrichtenadressierung, die beispielsweise auch bei LIN oder CAN eingesetzt wird. Dabei erhält jede Nachricht eine eindeutige Adresse oder ID. Diese ID gibt gleichzeitig an, wie der Inhalt der Nachricht zu interpretieren ist. Im Header der Nachricht ist lediglich eine einzelne Adresse/ID anzugeben. Die Filterung der Nachrichten erfolgt im Empfänger, wodurch Broadcasts oder Multicasts einfach zu realisieren sind. Über den geteilten Bus erhält jeder Knoten stets alle Botschaften und kann lokal entscheiden, ob die Nachricht für ihn von Bedeutung ist. Die Filterung beim Empfänger kann jedoch gleichzeitig als Nachteil gesehen werden, da jeder Knoten intern eine Liste der IDs vorhalten muss, die für ihn von Interesse sind. Abbildung 5.6 zeigt ein Beispiel der Nachrichtenadressierung mit einem 16 Bit ID-Feld. Sofern die Länge der Payload durch die ID vorherbestimmt ist, wird kein Längen-Feld benötigt. Andernfalls kann die ID beispielsweise in ein 12 Bit ID-Feld und ein 4 Bit Längen-Feld unterteilt werden. In dem gezeigten Beispiel kann die Payload durch die Extended Payload auf 10 Byte vergrößert werden.

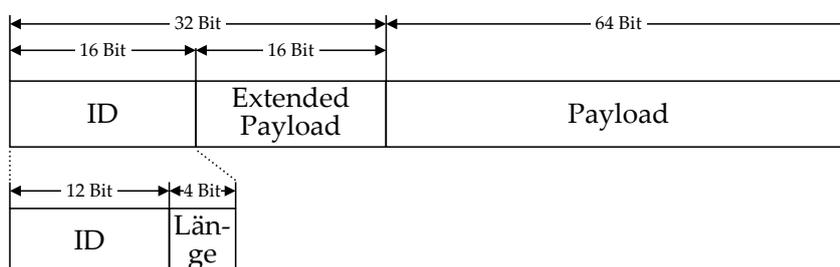


Abbildung 5.6: Beispiel der Nachrichtenadressierung

Weiterhin besteht die Möglichkeit eines hybriden Adressierungsschemas. Ein Teil der Adresse identifiziert die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Kommunikationsgruppe, der zweite Teil der Adresse kann entweder eine Knoten- oder Nachrichtenadresse sein. Ein Vorteil dieser Adressierung ist, dass die Bildung von Gruppen einfach geschehen kann. Allerdings wird durch die Aufteilung in Gruppen- und Knoten- bzw. Nachrichtenadressen erneut ein Overhead geschaffen. Ein Beispiel wird an dieser Stelle nicht gegeben, da das Adressierungsschema für den Einsatz im Fahrzeug durch den erhöhten Management-Overhead nicht geeignet ist.

Die Nachrichtenadressierung wird im Folgenden bevorzugt, da diese verschiedene Vorteile bietet. Zum einen wird der Protokoll-Overhead reduziert, wodurch die Payload vergrößert werden kann. Zum anderen können Funktionen mit geringem Aufwand auf andere Steuergeräte migriert werden, da durch die Nachrichten-IDs keine Bindung an bestimmte Knoten existiert.

5.2 Untersuchung des CSMA/CA Protokolls

Zur Untersuchung des CSMA/CA Medienzugriffs mit einer großen Anzahl an Stationen wurde ein Simulationsframework entwickelt. Ein CSMA/CA System kann auch analytisch beispielsweise anhand von Markov-Ketten untersucht werden. Für IEEE 802.11 gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen. Der Großteil basiert auf einem Modell von Giuseppe Bianchi [Bia00]. Üblicherweise werden Netze betrachtet, in denen alle Stationen stets Botschaften in ihrer Sendewarteschlange haben. Weiterhin gibt es ein einfaches Kanalmodell, das zwei Zustände einnehmen kann: *belegt* und *frei*. Alle Stationen haben daher eine gemeinsame Sicht auf den Kanal, wodurch jede Station in einer zweidimensionalen Markov-Kette modelliert werden kann. Die Kollisionswahrscheinlichkeit nimmt in diesem Fall einen festen Wert ein. Wird die QoS-Erweiterung IEEE 802.11e [IEE05] mit ihren vier Prioritätsklassen verwendet, erhöht sich die Dimension der Markov-Kette auf drei, da jede Station intern aus vier virtuellen Stationen besteht. Trotz der vier Prioritäten befinden sich stets alle Stationen im Backoff, da pro Station jeweils ein Backoff für die höchste Priorität innerhalb der Station gestartet wird.

Der Green PHY Standard definiert neben dem CSMA/CA Medienzugriff zusätzlich die Prioritätsauflösung mit vier Prioritäten. Falls auch hier die Annahme getroffen wird, dass alle Stationen immer Frames in ihren vier Sendewarteschlangen haben, kommt ausschließlich die höchste Priorität zum Zuge. Soll das Verhalten des Systems im nicht ausgelasteten Zustand untersucht werden, variiert die Anzahl an Stationen, die sich gleichzeitig im Backoff befinden. Dadurch ist die Kollisionswahrscheinlichkeit abhängig von der Anzahl der Stationen, die gleichzeitig einen Backoff ausführen. Die Kollisionswahrscheinlichkeit ist damit auch von der Priorität der Botschaft abhängig und kann nicht mehr mit dem zuvor erwähnten einfachen Kanalmodell beschrieben werden. Die Komplexität für die mathematische Modellierung steigt dadurch erheblich an. Aus diesem Grund dient im Folgenden eine Simulation dazu, Auskunft über das Systemverhalten bei unterschiedlichen Verkehrslasten zu erhalten.

Ein verfügbares Simulationsframework für die Simulation des HomePlug Standards wird von Holger Kellerbauer in seiner Dissertation [Kel12] beschrieben. Eine Analyse des Frameworks ergab jedoch, dass sich das Framework für die beabsichtigten Betrachtungen nicht eignet, da nicht alle Elemente im benötigten Umfang vorhanden sind. Weiterhin wäre der Aufwand für die nötigen Anpassungen sowie die Verifikation des vorhandenen Frameworks sehr hoch. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Framework entwickelt. Für die Simulation kommt das Open-Source Framework OMNeT++ [V⁺01], [OMN15] in Version 4.3.1 zum Einsatz.

5.2.1 OMNeT++ Simulationsframework

Bei OMNeT++ handelt es sich um ein Framework zur ereignisbasierten Simulation. Dies bedeutet, dass die Zeit in der Simulation nicht kontinuierlich abläuft. Stattdessen

wird jeweils vom Zeitpunkt eines Ereignisses zum Zeitpunkt des nächsten Ereignisses übergegangen. Der Systemzustand ändert sich zwischen diesen Ereignissen nicht. Als Beispiel dient das Aussenden einer Botschaft, was mit zwei Ereignissen modelliert wird. Der Start des Aussendens stellt das erste Ereignis dar. Zu diesem Zeitpunkt wird als weiteres Ereignis der Zeitpunkt eingeplant, an dem das Aussenden abgeschlossen ist. Im Simulationsablauf wird nach Abarbeitung eines Ereignisses das zeitlich nächste Ereignis aus dem Ereignis-Vektor ausgewählt. Die Simulationszeit wird auf den Zeitpunkt dieses Ereignisses gesetzt und es wird mit der Abarbeitung der an das Ereignis gekoppelten Systemvorgänge begonnen.

Im Folgenden werden die implementierten Module kurz beschrieben. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet, dass die Module flexibel eingesetzt werden können. Die meisten Parameter besitzen daher einen Standard-Wert. Dieser wird verwendet, sofern er nicht bei der Instanziierung des Moduls in der Konfiguration überschrieben wird. Die Standard-Werte entsprechen den Werten aus dem Green PHY Standard, sofern diese dort angegeben sind.

Folgende Module wurden implementiert:

- **PLC_Host:** In diesem Modul ist der Großteil der MAC-Schicht realisiert
- **PLC_Channel:** Ein Hilfsmodul, das den gemeinsamen Kanal nachbildet
- **Traffic_Gen:** Ein konfigurierbarer Verkehrsgenerator
- **StatisticsCollector:** Modul zur Erfassung von Simulationsstatistiken
- **PLC_Host_Comp2:** Ein OMNeT++ Compound-Modul, das einen **PLC_Host**, sowie zwei **Traffic_Gens** in einem Modul vereint

PLC_Host: In diesem Modul ist der Großteil des Medienzugriffs implementiert. Das Modul hat zwei Funktionen: Zum einen bildet es einen Green PHY Host ab, zum anderen kann das Modul zusätzlich die Funktion eines Central Coordinators (CCo) übernehmen. Zu Beginn einer Simulation wird der PLC_Host mit der niedrigsten Modul-ID ausgewählt und erhält das CCo-Flag. Das bedeutet, dass dieses Modul zusätzlich den Beacon im vorgegebenen Intervall aussendet. Jeder PLC_Host besitzt vier Warteschlangen für die vier Prioritäten (CA0-CA3).

Beim Start einer neuen Simulation warten zunächst alle Stationen auf einen eintreffenden Beacon. Wurde dieser empfangen, planen alle Stationen das Ende der Beacon Region ein, nach der die CSMA-Region beginnt. Nach der Beacon Region beginnt jede Station zunächst mit einer Prioritätsauflösung. Hat eine Station aktuell keinen Frame in seinen Warteschlangen, wird die Prioritätsauflösung für die niedrigste Priorität (CA0) ausgeführt. Für die Prioritätsauflösung ist eine Hilfsfunktion im PLC_Channel implementiert, die später erläutert wird. Nach der Prioritätsauflösung starten die Stationen, die einen Frame der aktuell höchsten Priorität besitzen, den Backoff. In jedem freien Slot wird der Backoff Counter dekrementiert. Ist der Wert Null erreicht, beginnt eine Station mit dem Aussenden des Frames. Trifft während des Aussendevorgangs ein weiterer Frame ein, so ist eine Kollision aufgetreten. In diesem Fall plant die

Station das Ende der Kollision ein, nach der der Kanal wieder als frei markiert wird. Ist keine Kollision aufgetreten, sendet der Empfänger des Frames nach der Dauer eines RIFS das Acknowledgment aus. PLC_Hosts, die nicht an der Übertragung oder Kollision beteiligt sind, setzen für die Dauer der Übertragung oder Kollision den Network Allocation Vector (NAV), der für die virtuelle Trägerprüfung verwendet wird.

PLC_Channel: Dieses Modul bildet in erster Linie den Kanal ab, wobei die physikalische Schicht in der Simulation nicht nachgebildet wird. Verschiedene vorangegangene Messungen der physikalischen Schicht im Fahrzeug (siehe Abschnitt 1.2) zeigen, dass mit einer zuverlässigen Kommunikation zu rechnen ist. Zusätzlich wird die HomePlug Frame Control mit erhöhter Redundanz ausgesendet. Aus diesen Gründen wird im Folgenden von einer fehlerfreien Übertragung auf der physikalischen Schicht ausgegangen. Sollen Fehler bei der Übertragung berücksichtigt werden, kann beim Empfang jedes Frames mit einer voreingestellten Wahrscheinlichkeit entschieden werden, ob ein Frame verworfen wird. Wird ein Frame verworfen, sendet der Empfänger kein Acknowledgment, wodurch der Sender einen erneuten Sendeversuch startet.

Alle PLC-Knoten im Netz sind mit dem zentralen PLC_Channel jeweils über einen *DelayChannel* verbunden. Jedem *DelayChannel* kann bei der Definition des Netzes eine Verzögerung zugeordnet werden, um die Ausbreitungsverzögerungen durch unterschiedliche Pfade zu modellieren. Der PLC_Channel sendet eine Kopie einer Nachricht, die er an einem seiner Ports empfängt, an allen anderen Ports aus. Damit wird der Broadcast-Kanal nachgebildet. Um die Prioritätsauflösung in der Simulation zu beschleunigen, bietet der PLC_Channel eine weitere Funktion. Bei der Prioritätsauflösung sendet jeder Knoten seine aktuell höchste Nachrichten-Priorität aus. Diese Informationen müssen theoretisch an alle anderen Stationen verteilt werden, damit diese jeweils die aktuell höchste Priorität im Netz identifizieren können. Für 100 Knoten wären dies 100 Nachrichten, die der PLC_Channel von den Knoten erhält und $100 \cdot 99$ Nachrichten, die der PLC_Channel an die anderen Knoten weiterleitet. Diese hohe Anzahl an Nachrichten erhöht die Simulationsdauer erheblich, da jede Nachricht wiederum durch Ereignisse realisiert wird, die abgearbeitet werden müssen. Daher sammelt der PLC_Channel zunächst alle Nachrichten der Knoten und sendet am Ende des ersten Prioritätsauflösungsslots jeweils nur eine Nachricht mit der höchsten Priorität an alle angeschlossenen Stationen. Im Beispiel mit 100 Knoten kann die Anzahl der Nachrichten bei der Prioritätsauflösung dadurch von 10.000 auf 200 Nachrichten reduziert werden.

Traffic_Gen: Mit diesem Modul wird ein Verkehrsgenerator realisiert, der zwei Betriebsmodi besitzt: *PERIODIC* und *RANDOM*. Ist der Modus auf *PERIODIC* eingestellt, erzeugt der Verkehrsgenerator periodisch Frames mit einem konfigurierbaren maximalen Jitter. Wird *RANDOM* verwendet, werden Frames mit exponentiell verteilten Zwischenankunftszeiten erzeugt. Das Modul weist den erzeugten Frames auch

die Priorität zu und es kann für jeden Frame definiert werden, ob für ihn eine Bestätigung erwartet wird. Weiterhin kann den Frames eine Verkehrsklasse zugeordnet werden, die bei der Auswertung der Simulationsergebnisse verwendet wird. Beispielsweise können alle periodischen Frames einer Klasse A und alle ereignisbasierten Frames einer Klasse B zugeordnet werden.

StatisticsCollector: Der StatisticsCollector dient zur Aufzeichnung verschiedener Werte während der Simulation. Beispiele sind die aktuelle Anzahl erfolgreich gesendeter Frames, die Anzahl an Kollisionen oder die aufsummierte Verzögerung der Botschaften, um die mittlere Verzögerung am Ende der Simulation zu berechnen. Die *finish()*-Funktion im StatisticsCollector gibt am Ende der Simulation zusätzlich die gesammelten Ergebnisse sowohl im Ereignislog als auch in einer Ausgabedatei aus.

Der StatisticsCollector hat keine direkte Verbindung zu den anderen Modulen. Die Module suchen sich bei ihrer Initialisierung den Pointer auf die StatisticsCollector-Klasse und greifen darüber direkt auf die Funktionen der Klasse zu. Dies hat den Vorteil, dass zur Statistikerfassung keine eigenen Nachrichten erstellt werden, welche die Dauer der Simulation erhöhen würden.

PLC_Host_Comp2: Dieses Modul ist ein sogenanntes Compound-Modul. Diese Module werden verwendet, um andere Module in einem neuen übergeordneten Modul zusammenzufassen. Wie in Abbildung 5.7 zu sehen, enthält das Modul zwei Verkehrsgeneratoren. Der zweite Verkehrsgenerator wird verwendet, wenn ein Host sowohl periodischen als auch ereignisbasierten Verkehr erzeugen soll.

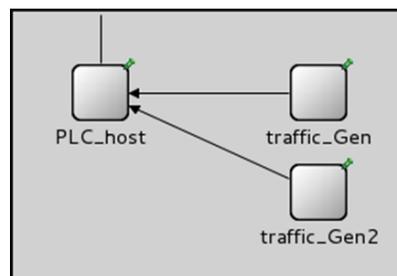


Abbildung 5.7: PLC_Host_Comp2 OMNeT++ Modul

5.2.2 Verwendete Parameter

Der Großteil der Parameter kann der Tabelle 5.1 entnommen werden. Weitere Parameter sind in Tabelle 5.5 gegeben. Mit dem Parameter *maxRetries* wird die Anzahl an erneuten Sendeversuchen angegeben. Dieser Wert ist im Standard nicht definiert und wird hier auf sieben gesetzt. Eine Begründung für diese Wahl wird im nächsten Abschnitt gegeben.

Tabelle 5.5: Weitere Parameter für die Simulation

Parameter	Wert
Beacon Periode	50 ms
Beacon Region	443,08 μ s
$T_{\text{Frame}} = T_{\text{FC_only}}$	110,48 μ s
$T_{\text{ACK}} = T_{\text{Frame}}$	110,48 μ s
maxRetries	7

Die Verzögerungen auf den einzelnen Leitungen zwischen den PLC_Hosts und dem PLC_Channel wurden bei Erzeugung des Netzes jeweils zufällig zwischen 0 und 100 ns gewählt. Damit ergeben sich Verzögerungen von 0 bis 200 ns zwischen den einzelnen PLC_Hosts. Wird von der Lichtgeschwindigkeit als Ausbreitungsgeschwindigkeit im Leiter ausgegangen, entsprechen 200 ns in etwa einer Leitungslänge von 60 m. Das einmalig erzeugte Netz mit 100 Knoten wird für alle Simulationen verwendet.

5.2.3 Szenarien

Es werden verschiedene Szenarien betrachtet, um das Verhalten des Protokolls zu bewerten. Zu jedem Szenario werden mehrere Durchläufe (Runs) mit unterschiedlichen Startwerten für den Zufallsgenerator ausgeführt. Dies ist nötig, da in einigen Bereichen eine minimale Schwankung in den Zufallszahlen zu einer großen Änderung in den Simulationsergebnissen führt. Zur Bewertung der Schwankungen wurde das 95% Konfidenzintervall bestimmt und darauf geachtet, dass sich die Konfidenzintervalle nicht überlappen.

Simulationsergebnisse werden jeweils mit und ohne Bestätigungen betrachtet. Bei Simulationen mit Bestätigungen wurde das Retry Limit auf den Wert sieben eingestellt. Da dieser Wert im HomePlug Standard nicht vorgegeben ist, wurde der Wert aus dem IEEE 802.11 Standard verwendet. Ein Retry Limit von sieben bedeutet, dass ein Frame nach Kollisionen bis zu sieben Mal erneut übertragen wird, bevor er verworfen wird.

Bei der Vergabe der Prioritäten wurden verschiedene Zuteilungen untersucht. Im einfachsten Fall wird allen Frames die gleiche Priorität zugeordnet. In diesem Fall verhalten sich die Prioritäten CA0 & CA1 bzw. CA2 & CA3 identisch, da die Backoff-Parameter jeweils für CA0 & CA1 bzw. CA2 & CA3 identisch sind. Weiterhin wurden zwei andere Verteilungen der Prioritäten untersucht. Mit Hilfe der Prioritäten kann die Anzahl an Stationen reduziert werden, die gleichzeitig einen Backoff starten, wodurch die Kollisionswahrscheinlichkeit verringert wird. Allerdings hat der Eingriff einen Einfluss auf die mittlere Verzögerung. Als weitere Prioritätsverteilungen wurde zum einen eine Gleichverteilung verwendet, zum anderen die in Tabelle 5.6 angegebene Verteilung.

Tabelle 5.6: Alternative Prioritätsverteilung

Priorität	Wahrscheinlichkeit
CA0	40%
CA1	30%
CA2	20%
CA3	10%

Für die im nächsten Abschnitt gezeigten Ergebnisse erzeugten alle Verkehrsgeneratoren exponentialverteilten Verkehr. In Summe über alle Stationen ergibt sich die angegebene erzeugte Framerate.

5.2.4 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die CSMA/CA Simulationsergebnisse für die im vorherigen Abschnitt definierten Prioritätsverteilungen vorgestellt und diskutiert [GKK14], [GKLK14]. Zur Beurteilung der Ergebnisse wird im Folgenden zunächst der theoretische Maximalwert der Übertragungsrate bestimmt.

Maximale theoretische Übertragungsrate

Bevor die Simulationsergebnisse betrachtet werden, wird zunächst analytisch bestimmt, wie hoch die Übertragungsrate im kollisionsfreien Fall maximal ist. Das Maximum wird erreicht, wenn der Backoff stets die minimale Länge aufweist. Die minimale Länge ergibt sich, wenn statt einem zufälligen gleichverteilten Wert aus dem Contention Window stets der Wert Null gewählt wird. Dies bedeutet, dass direkt nach der Prioritätsauflösung ohne zusätzlichen Backoff mit der Übertragung begonnen wird. Die sich ergebende Übertragungsrate ist ein theoretisches Maximum, welches in einem realen Szenario nicht erreicht wird, da für den kollisionsfreien Fall nur eine Station senden darf. Weiterhin geht die Wahrscheinlichkeit, dass eine einzelne Station stets den Wert Null aus dem Contention Window wählt, gegen Null. Sind dagegen ausreichend sendebereite Stationen vorhanden, kann zwar erreicht werden, dass die Wahrscheinlichkeit gegen Eins geht, dass eine der Stationen jeweils direkt nach der Prioritätsauflösung eine Übertragung beginnt. Allerdings treten mit mehreren sendenden Stationen Kollisionen auf, wodurch sich der erreichbare Durchsatz verringert.

Neben dem theoretischen Maximum der Übertragungsrate wird auch der Erwartungswert für eine sendende Station bestimmt. Da keine Kollisionen auftreten, wird immer das Contention Window mit der minimalen Größe ($CW=7$) verwendet. Im Mittel beträgt die Backofflänge mit diesem Contention Window 3,5 Slots. In Tabelle 5.7 sind die berechneten maximalen Übertragungsraten in Frames pro Sekunde angegeben. Neben den Angaben für die minimale und mittlere Backofflänge sind die Werte

angegeben, die sich mit und ohne Bestätigungen ergeben. Falls die vier Prioritäten des Standards nicht verwendet werden, kann theoretisch auf die Prioritätsauflösung verzichtet werden. Um den Overhead durch die Prioritätsauflösung zu zeigen, sind in Tabelle 5.7 auch die Übertragungsraten ohne Prioritätsauflösung gegeben.

Tabelle 5.7: Maximale CSMA/CA Übertragungsraten

Backoff Ø	ACKs	Frames/s	
		mit PRS	ohne PRS
0 Slots	mit	1860	2140
3,5 Slots		1500	1680
0 Slots	ohne	3500	4700
3,5 Slots		2420	2940

Es ist zu erkennen, dass sich die maximale Übertragungsrate ohne Bestätigungen deutlich erhöhen lässt. Allerdings können in diesem Fall keine Übertragungsfehler erkannt werden, was besonders bei einer hohen Anzahl an Stationen nötig ist. Ohne die Prioritätsauflösung ist die Übertragungsrate zwar ebenfalls zu erhöhen, die Verwendung von Prioritäten kann jedoch die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen deutlich reduzieren, was anhand der Simulationsergebnisse gezeigt wird.

Abschließend wird bestimmt, wie viel Übertragungszeit durch den Protokoll-Overhead belegt ist. Die Beacon Region wird nicht berücksichtigt, da der Overhead von der gewählten Dauer der Beacon Periode abhängt. Als Protokoll-Overhead wird die Zeit bezeichnet, die nicht für die Frameübertragung genutzt wird. Für die Übertragung mit Bestätigungen sind dies: Prioritätsauflösung, Backoff, Bestätigung sowie die Interframe Spaces RIFS und CIFS. Für die mittlere Backofflänge im kollisionsfreien Fall bei Verwendung von Bestätigungen berechnet sich der Protokoll-Overhead zu:

$$T_{Overhead} = 2 \cdot T_{PRS} + 3,5 \cdot T_{Slot} + T_{RIFS} + T_{ACK} + T_{CIFS} = 547,60 \mu s \quad (5.7)$$

Für die gesamte Übertragungsdauer wird die Dauer der Frameübertragung (T_{FC_only}) addiert. Damit beträgt die Gesamtdauer im Mittel 658,08 μs . Dies bedeutet, dass im kollisionsfreien Fall bei mittlerer Backofflänge knapp über 83% der Übertragungszeit auf den Overhead entfällt. Ohne Bestätigungen entspricht der Protokoll-Overhead mit 297,12 μs noch immer über 72% der Übertragungszeit.

Ergebnisse ohne Bestätigungen

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse ohne Bestätigungen vorgestellt. In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse für den Fall dargestellt, dass allen Frames die Priorität CA1 zugeteilt wird. Die Ergebnisse für Priorität CA0 sind identisch, da CA0 und CA1 dieselben Backoffparameter verwenden. Auf der Abszisse ist der über alle Stationen hinweg erzeugte mittlere Verkehr in Frames pro Sekunde angegeben. Auf der

linken Ordinate ist angegeben, wie viele Frames pro Sekunde erfolgreich übertragen werden (grüne Kurve) bzw. wie viele Kollisionen pro Sekunde aufgetreten sind (rote Kurve). Neben den erfolgreich übertragenen und kollidierten Frames pro Sekunde ist auf der rechten Ordinate die mittlere Wartezeit T_W der Frames in den Warteschlangen angegeben (blaue Kurve). Anhand der Marker auf der blauen Kurve ist die Schrittweite zu erkennen, in der der Verkehr in der Simulation erhöht wurde. Um die Graphen besser vergleichen zu können, sind vertikale Linien eingezeichnet, bei denen 1%, 3% und 5% der gestarteten Übertragungen kollidieren. Ohne Bestätigungen können diese Kollisionen nicht erkannt werden. Dies bedeutet, dass kollidierte Frames nicht erneut übertragen werden und somit verloren gehen.

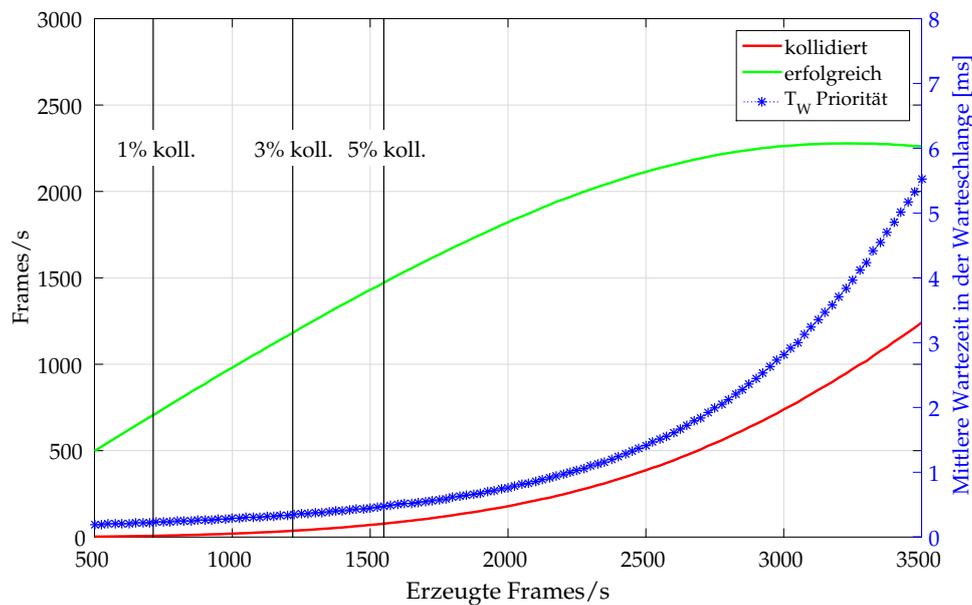


Abbildung 5.8: CSMA/CA ohne Bestätigungen, Priorität CA1

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse bei Verwendung von Priorität CA3 gezeigt. Die Ergebnisse für Priorität CA2 sind wieder vergleichbar, da die Backoffparameter von CA2 und CA3 identisch sind. Es lassen sich bei den erfolgreich übertragenen sowie kollidierten Frames nur minimale Unterschiede zur Priorität CA1 feststellen. Anhand der 5% Kollisions-Linie ist zu erkennen, dass diese hin zu einem niedrigeren Verkehrswert verschoben ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass die mittlere Wartezeit in der Warteschlange deutlich niedriger ist. Diese Effekte lassen sich durch die Backoffparameter aus Tabelle 4.5 (Seite 56) begründen. Für Werte des BPC kleiner zwei sind die Parameter identisch. Ab $BPC \geq 2$ ist das Contention Window bei Priorität CA2 & CA3 kleiner, was zu einem kürzeren mittleren Backoff führt. Dadurch steigt zum einen die Kollisionswahrscheinlichkeit, zum anderen reduziert sich jedoch auch die mittlere Verweildauer der Frames in der Warteschlange.

Da der Standard vier Prioritätsstufen bereitstellt, ist es sinnvoll diese auch zu nutzen. Dadurch werden einerseits wichtige Botschaften bevorzugt übertragen, andererseits

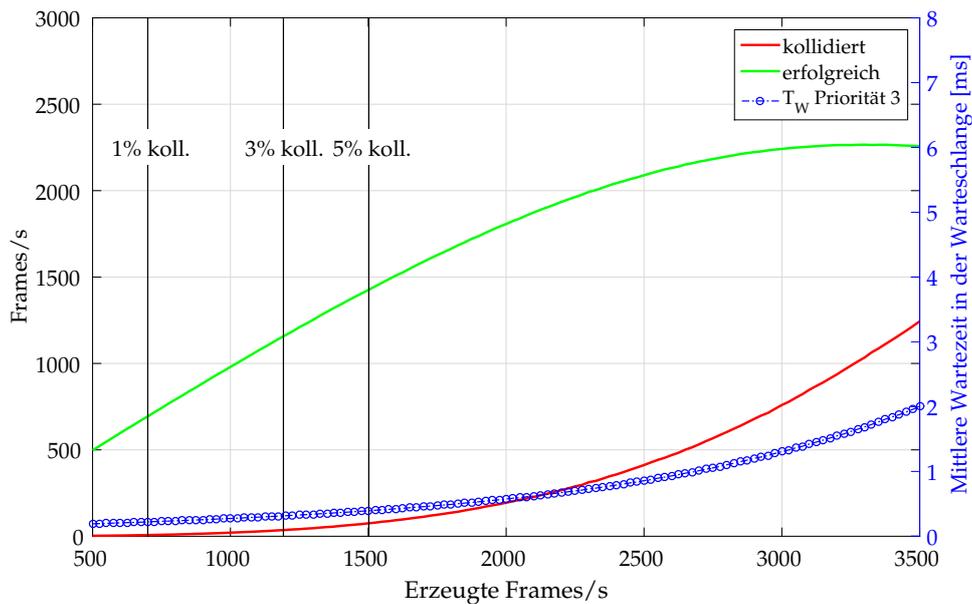


Abbildung 5.9: CSMA/CA ohne Bestätigungen, Priorität CA3

wird die Kollisionswahrscheinlichkeit reduziert. Bei den Ergebnissen in Abbildung 5.10 wurde jedem Frame bei dessen Erzeugung eine zufällige Priorität zugeordnet. Es ist zu erkennen, dass die vertikalen Linien, die Verkehrswerte bei 1%, 3% und 5% Kollisionsrate markieren, hin zu höheren Verkehrswerten verschoben sind. Der Effekt, dass sowohl bei der Kurve der erfolgreich übertragenen als auch bei den kollidierten Frames bei ca. 2500 Frames/s bzw. ca. 2800 Frames/s lokale Maxima auftreten, ist durch die Verwendung der vier Prioritäten zu erklären. Je mehr Frames erzeugt wer-

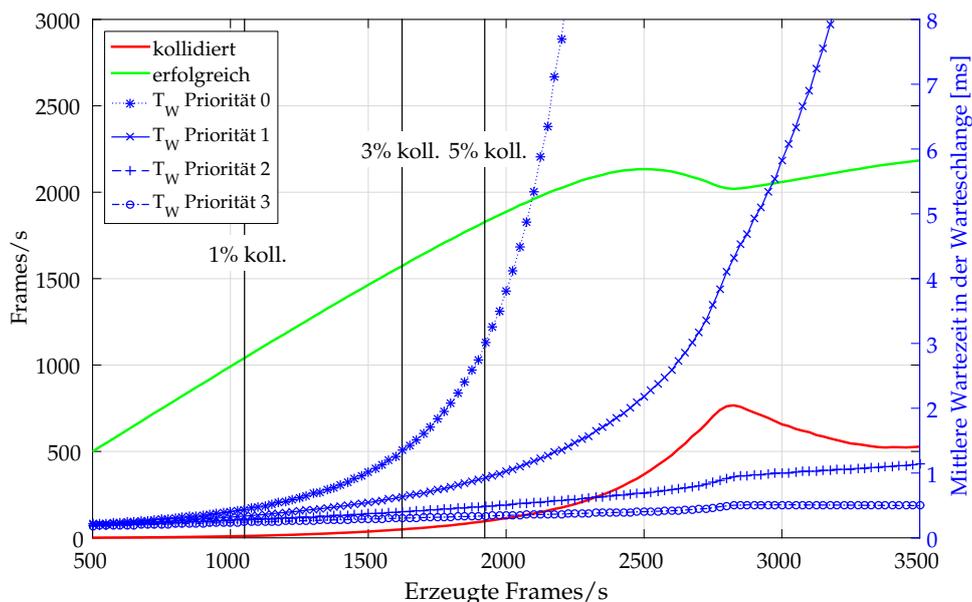


Abbildung 5.10: CSMA/CA ohne Bestätigungen, gleichverteilte Prioritäten

den, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die niedrigste Priorität CA0 kaum noch bzw. nicht mehr bedient wird, was auch an einem raschen Anstieg der mittleren Verweildauer in der Warteschlange zu erkennen ist. Diese schrittweise Verdrängung der niedrigeren drei Prioritäten, die bei einer weiteren Erhöhung des erzeugten Verkehrs zu beobachten ist, erzeugt insgesamt drei dieser Maxima. Die zwei weiteren Maxima sind in Abbildung 5.10 jedoch nicht dargestellt. Eine Betrachtung höherer Verkehrswerte als die hier gezeigten ist nicht sinnvoll, da bereits in Abbildung 5.10 die niedrigste Priorität bei Verkehrswerten ab ca. 2300 Frames/s rasch verdrängt wird, was für den Einsatz im Fahrzeug nicht gewünscht ist.

In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse einer anderen Prioritätsverteilung dargestellt. Bei der verwendeten Prioritätsverteilung wird der Anteil an höherpriorien Frames mit zunehmender Priorität reduziert. 40% der erzeugten Frames erhalten die Priorität CA0, 30% CA1, 20% CA2 und 10% CA3 (siehe Tabelle 5.6). Da der Anteil an niederprioriem Verkehr (besonders CA0 und CA1) vergrößert wird, ist auch die mittlere Backofflänge höher. Dadurch kann zunächst die Kollisionswahrscheinlichkeit gesenkt werden. Allerdings erhöht sich auch die Anzahl an Stationen, die gleichzeitig einen Frame der Priorität CA0 oder CA1 haben, was wiederum die Kollisionswahrscheinlichkeit dieser Frames erhöht. Anhand der vertikalen Linien für die Kollisionswahrscheinlichkeiten lässt sich erkennen, dass durch diese Prioritätsverteilung im Vergleich zu Abbildung 5.10 die entsprechenden Kollisionsraten bereits bei niedrigeren Verkehrswerten auftreten. Durch die geänderte Prioritätsverteilung werden die Prioritäten später verdrängt. Erklären lässt sich dies durch die reduzierte Anzahl an hochpriorien Frames. Das wiederum führt dazu, dass erst bei einem höheren Verkehrswert der Punkt erreicht wird, ab dem die Wahrscheinlichkeit gegen Eins geht, dass stets Frames mit Priorität höher CA0 vorhanden sind.

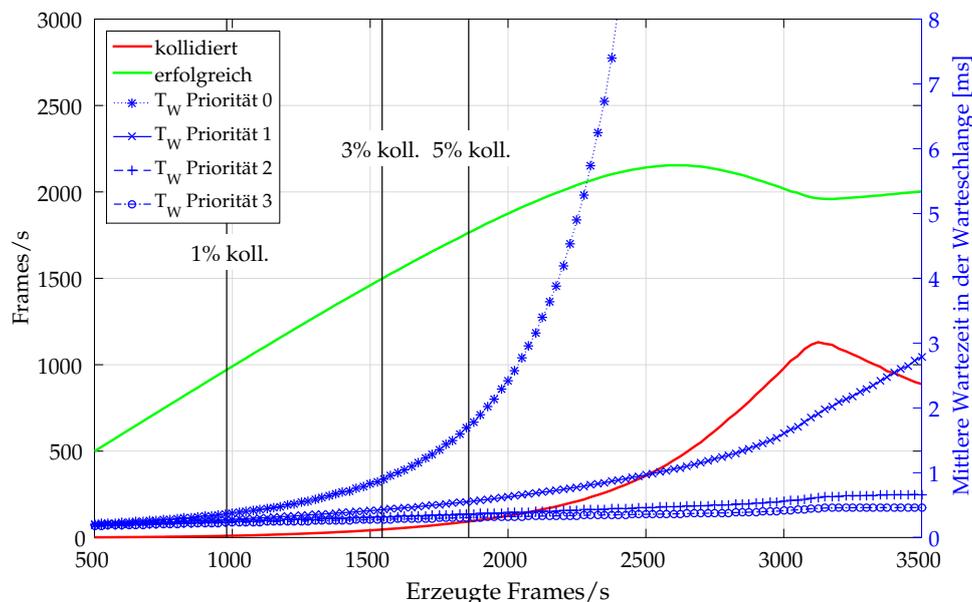


Abbildung 5.11: CSMA/CA ohne Bestätigungen, CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Ergebnisse sind in Abbildung 5.12 die 95% Konfidenzintervalle für die Prioritätsverteilung nach Tabelle 5.6 eingezeichnet. Die Konfidenzintervalle sind klein und überlappen sich nicht. Für die dargestellte Genauigkeit sind bereits 10 Simulationsdurchläufe ausreichend.

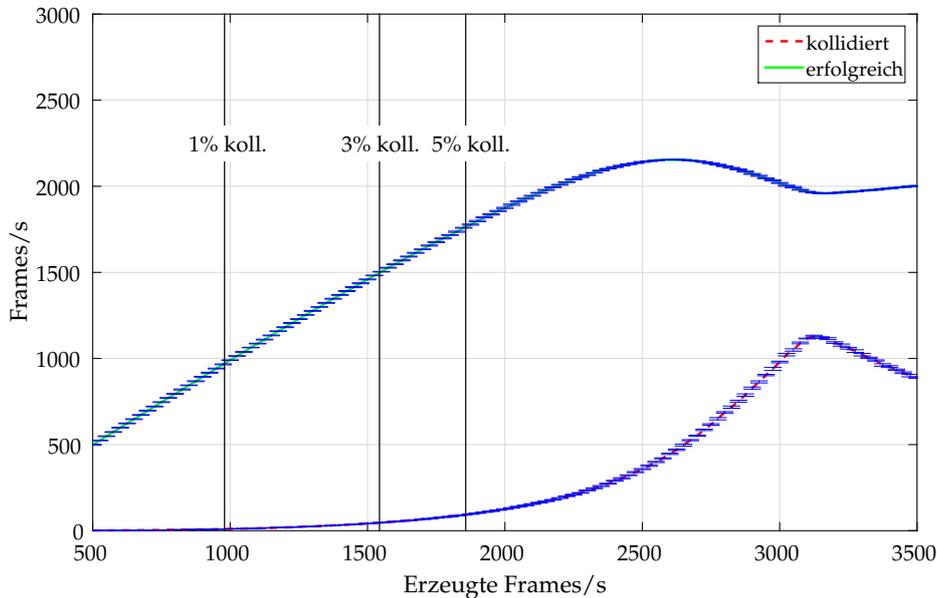


Abbildung 5.12: CSMA/CA ohne ACKs, 95% Konf., CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%

Ergebnisse mit Bestätigungen

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse bei Verwendung von Bestätigungen mit einem Retry Limit von sieben gezeigt. In Abbildung 5.13 und 5.14 sind die Ergebnisse bei ausschließlicher Verwendung der Priorität CA1 bzw. CA3 gezeigt. Die Skalierung von Abszisse und Ordinate wurde im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Bestätigungen angepasst, da durch die Bestätigungen der Overhead erhöht wird, wodurch sich der maximale Durchsatz reduziert. Der Effekt der erneuten Übertragungen nach Kollisionen ist zu beobachten. Beim Vergleich von Abbildung 5.8 mit Abbildung 5.13 ist zu erkennen, dass ohne Bestätigungen beispielsweise bei 1000 erzeugten Frames pro Sekunde im Mittel nur 980,71 Frames/s erfolgreich übertragen werden. Mit Bestätigungen werden bei gleichem Verkehrsaufkommen trotz des höheren Overheads im Mittel 998,86 Frames/s erfolgreich übertragen. Frames gehen nur verloren, wenn sie auch bei siebenmaliger erneuter Übertragung kollidieren. In Abbildung 5.14 ist im Vergleich zu Abbildung 5.13 wie bei Simulationen ohne Bestätigungen zu sehen, dass durch den im Mittel kürzeren Backoff bei Verwendung der höheren Priorität die Kollisionswahrscheinlichkeit erhöht wird.

Abbildung 5.15 zeigt die Ergebnisse bei gleichverteilten Prioritäten, Abbildung 5.16 bei Verwendung der Prioritätsverteilung aus Tabelle 5.6. Das Verhalten ist erneut ähnlich zu den Simulationen ohne Bestätigungen. Allerdings ist zu erkennen, dass bei-

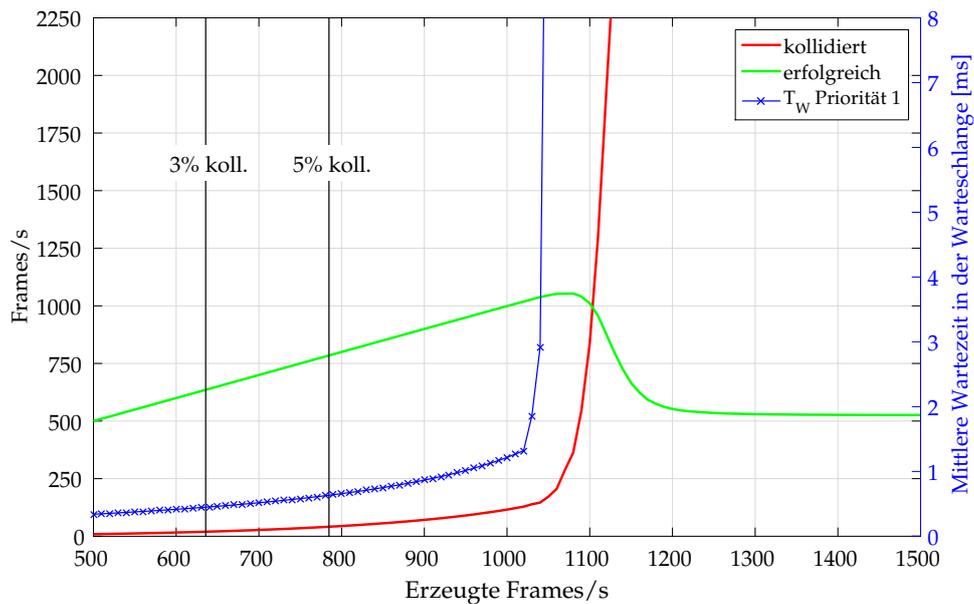


Abbildung 5.13: CSMA/CA mit Bestätigungen, Priorität CA1

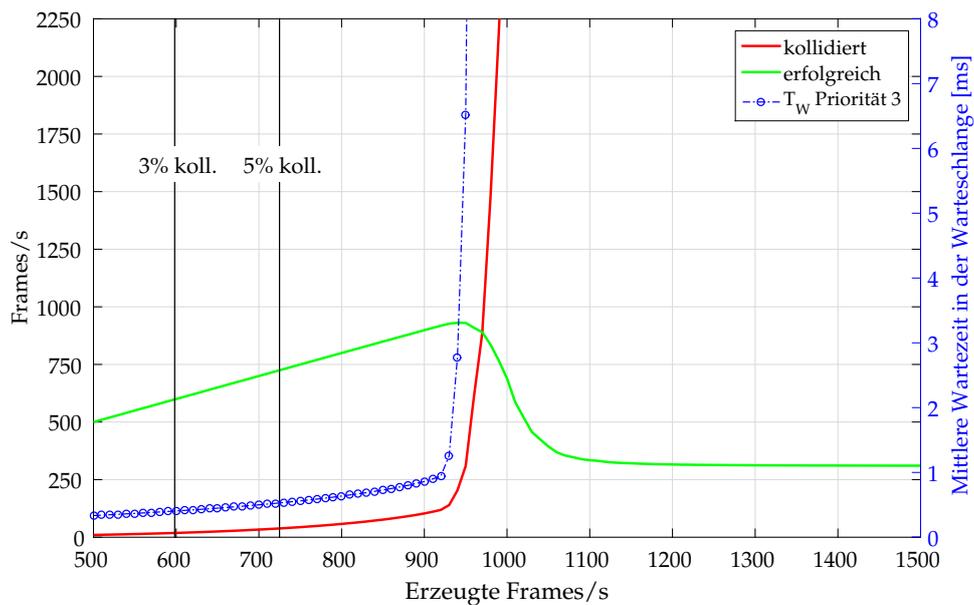


Abbildung 5.14: CSMA/CA mit Bestätigungen, Priorität CA3

spielsweise bei einem Verkehrsaufkommen von 1200 Frames/s durch die erneuten Übertragungen im Mittel 1198,74 (gleichverteilte Prioritäten) bzw. 1197,60 Frames/s (Verteilung aus Tabelle 5.6) erfolgreich übertragen werden können.

Um die gewünschte Genauigkeit der Ergebnisse mit Bestätigungen zu erhalten, sind wegen der Bestätigungen und den erneuten Übertragungen deutlich mehr Simulationsdurchläufe nötig. Eine geringe Schwankung in den Zufallszahlen kann eine deutliche Abweichung in den Ergebnissen hervorrufen. Es wurden insgesamt 1000 Durch-

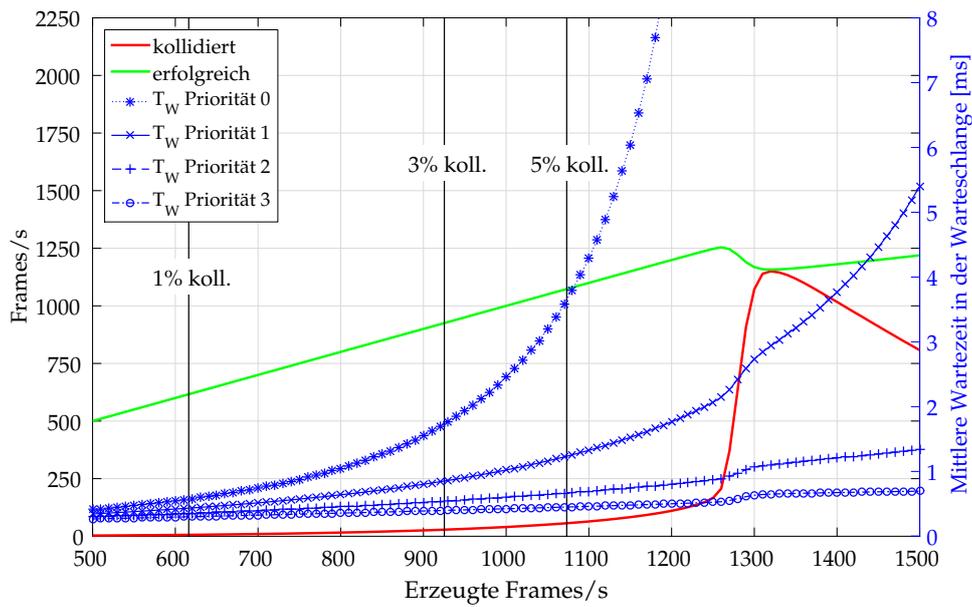


Abbildung 5.15: CSMA/CA mit Bestätigungen, gleichverteilte Prioritäten

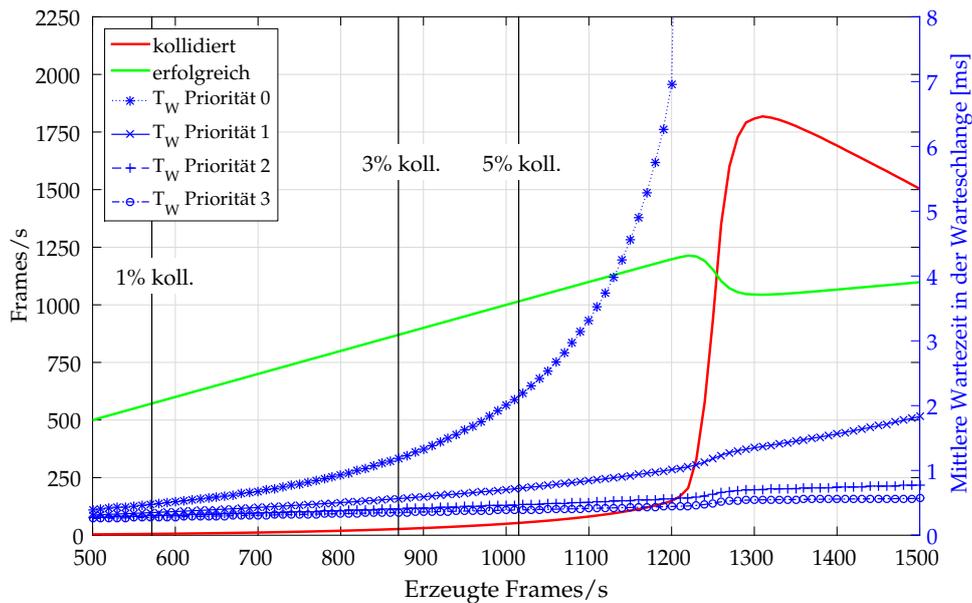


Abbildung 5.16: CSMA/CA mit Bestätigungen, CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%

läufe ausgeführt. Beispielpfaden sind in Abbildung 5.17 erneut die 95% Konfidenzintervalle für die Prioritätsverteilung nach Tabelle 5.6 eingezeichnet.

Erhöhung der Anzahl an Stationen

In den bisher gezeigten Simulationsergebnissen betrug die Anzahl an PLC-Knoten stets 100. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie sich eine Erhöhung der Anzahl an

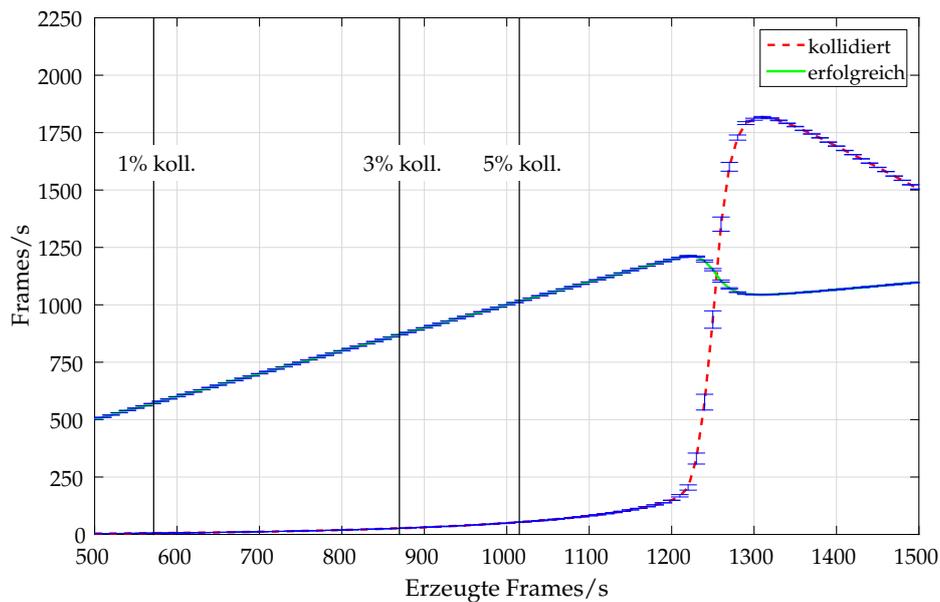


Abbildung 5.17: CSMA/CA mit ACKs, 95% Konf., CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%

Teilnehmern auf die Kollisionswahrscheinlichkeit auswirkt. In Abbildung 5.18 sind die Ergebnisse bei Verwendung von Bestätigungen und gleichverteilten Prioritäten für 300 PLC-Knoten dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 5.15 ist zu erkennen, dass die Kollisionsrate mit zunehmendem Verkehrsangebot ansteigt. Bei niedriger Last ist kaum eine Veränderung zu beobachten. Die Linien, welche die Verkehrswerte bei 3% und 5% Kollisionsrate markieren, sind nur geringfügig zu niedrigeren Verkehrswerten verschoben. Allerdings ist zu erwähnen, dass eine gesteigerte Anzahl an Knoten

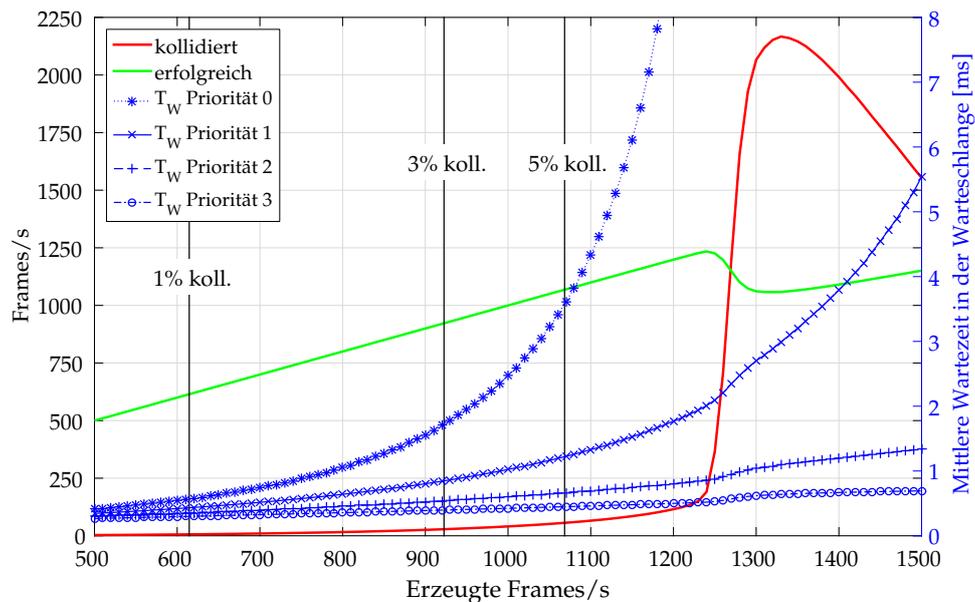


Abbildung 5.18: CSMA/CA mit Bestätigungen, zufällige Prioritäten, 300 Knoten

in der Regel auch zu einem erhöhten Kommunikationsbedarf führt. Ab 1250 erzeugten Frames pro Sekunde ist ein sprunghafter Anstieg der Kollisionen festzustellen. Die Verringerung der Kollisionsrate nach dem lokalen Maximum bei 1330 Frames/s ist erneut durch die Verdrängung der niedrigsten Priorität zu erklären.

5.2.5 Dynamische Repriorisierung

Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse fällt die hohe Anzahl an Kollisionen mit steigendem Verkehrsaufkommen auf. Im HomePlug Standard wird durch die Verlängerung des Backoffs bei hoher Kanalnutzung bereits versucht, die Kollisionswahrscheinlichkeit zu senken. Allerdings ist ein solcher Mechanismus stets ein Kompromiss zwischen einem niedrigen Overhead und einer geringen Kollisionswahrscheinlichkeit, da der Standard je nach Einsatzgebiet mit einer starken Variation der Anzahl an Stationen konfrontiert ist. Sind wenige Stationen vorhanden, sollte der Overhead durch den Backoff-Mechanismus minimiert werden. Ist die Anzahl an Stationen dagegen hoch, ist es wichtig, die Kollisionswahrscheinlichkeit gering zu halten.

Durch die Prioritätsauflösung des HomePlug Standards starten jeweils nur die Stationen mit einem Frame der höchsten Priorität einen Backoff. Basierend auf dieser Eigenschaft wird eine Modifikation vorgeschlagen. Ziel ist die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit mehrerer aufeinanderfolgender Kollisionen eines Frames. Durch die neue dynamische Repriorisierung [GKLG14], [KGLb] werden bereits kollidierte Frames im Anschluss bevorzugt behandelt, um die Wahrscheinlichkeit weiterer Kollisionen zu reduzieren. In einer ersten Ausprägung werden standardmäßig die niedrigsten drei Prioritätsklassen CA0 bis CA2 verwendet. Tritt eine Kollision auf, wird die Priorität der kollidierten Frames auf die höchste Priorität (CA3) angehoben (siehe Abbildung 5.19). Dies führt dazu, dass beim nächsten Backoff nur die Frames teilnehmen, bei denen bereits eine Kollision aufgetreten ist.

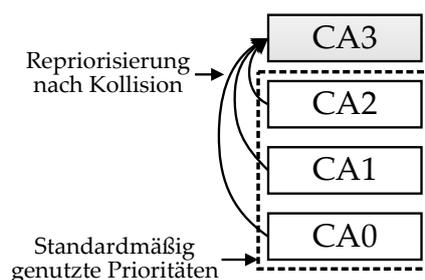


Abbildung 5.19: Dynamische Repriorisierung mit drei Standardprioritäten

Um die Auswirkungen der Repriorisierung zu beurteilen, werden zwei Simulationen durchläufe mit jeweils 100 PLC-Knoten betrachtet. Da die Anzahl an standardmäßig verfügbaren Prioritäten durch den Mechanismus reduziert ist, werden im ersten Durchlauf nur die niedrigsten drei Prioritäten ohne dynamischer Repriorisierung betrachtet. Die Ergebnisse können im Anschluss mit aktivierter dynamischer Repriorisierung verglichen werden. Zusätzlich können die Ergebnisse mit der Verwendung

aller vier Prioritäten aus Abbildung 5.15 verglichen werden. In Abbildung 5.20 sind die Simulationsergebnisse dargestellt, die sich bei Verwendung der niedrigsten drei Prioritäten (CA0 bis CA2) ohne dynamischer Repriorisierung ergeben. Für die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse sind die Prioritäten gleichverteilt.

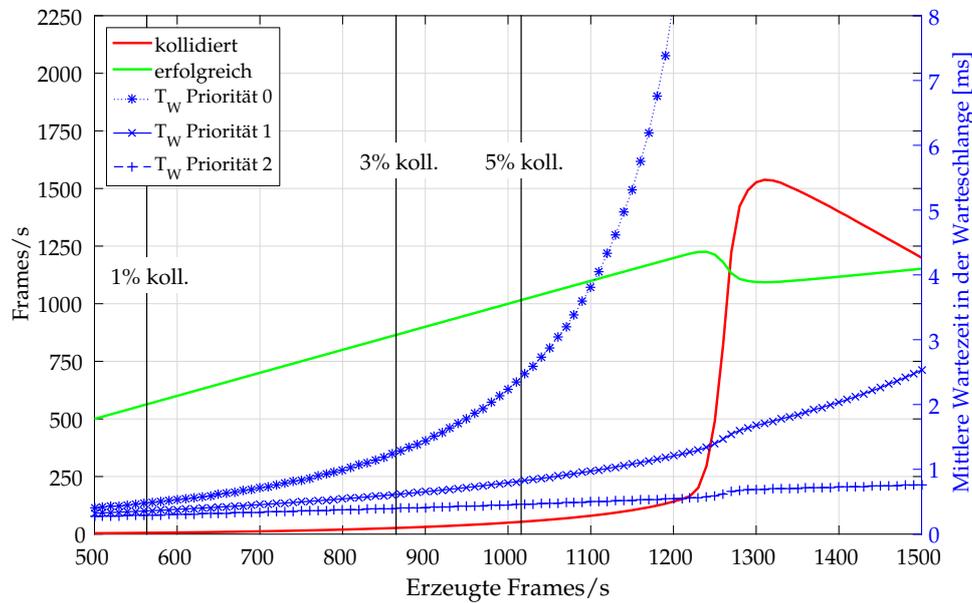


Abbildung 5.20: CSMA/CA mit Bestätigungen, ohne dynamische Repriorisierung

In Abbildung 5.21 sind die Ergebnisse mit dynamischer Repriorisierung dargestellt. Im Bereich mit geringer Kollisionsrate (unter 1100 erzeugten Frames/s) ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Bei 1100 erzeugten Frames/s ist bei genauer Betrachtung

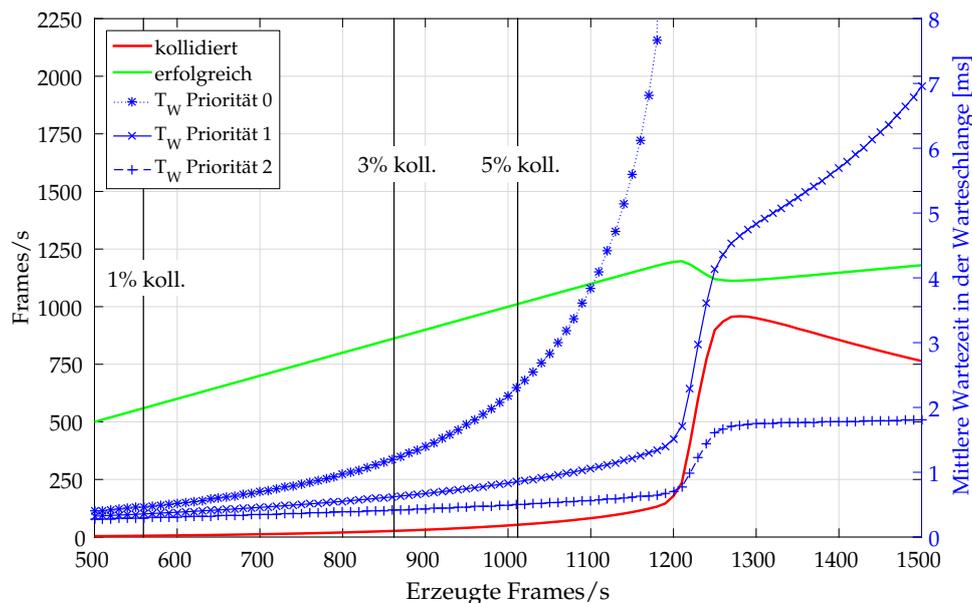


Abbildung 5.21: CSMA/CA mit Bestätigungen und dynamischer Repriorisierung

bereits ein Unterschied zu sehen. Die mittlere Wartezeit in den Warteschlangen ist mit dynamischer Repriorisierung minimal erhöht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei geringer Anzahl an gleichzeitig kollidierten Frames (minimal kollidieren exakt zwei Frames) im Anschluss nur diese Stationen einen Backoff durchführen. Bei geringer Anzahl an Stationen, die sich im Backoff befinden, ist dieser mit den im Standard definierten Parametern für CA3 zu lang. Durch eine Anpassung der Backoff-Parameter für Priorität CA3 kann dieser negative Effekt vermieden werden. Wird der Verkehr weiter erhöht, kann ein deutlicher Unterschied in der Anzahl an Kollisionen beobachtet werden. Ohne dynamische Repriorisierung liegt die maximale Anzahl an Kollisionen bei knapp über 1500 Frames/s. Mit dynamischer Repriorisierung kollidieren dagegen weniger als 1000 Frames/s. Bei einem Verkehrswert von 1500 erzeugten Frames/s können mit dynamischer Repriorisierung 1180 Frames/s erfolgreich übertragen werden, ohne dynamischer Repriorisierung lediglich 1152 Frames/s. Im Vergleich zu Abbildung 5.15 lässt sich jedoch feststellen, dass dort bei 1500 erzeugten Frames/s und unter Verwendung aller vier Prioritäten 1219 Frames/s erfolgreich übertragen werden.

Eine weitere Auswirkung der Repriorisierung ist anhand der mittleren Wartezeit in den Warteschlangen zu erkennen. Sobald es zu Kollisionen kommt und die kollidierten Frames repriorisiert werden, ist besonders bei den beiden höchsten verwendeten Prioritäten CA2 und CA1 eine deutliche Erhöhung der mittleren Wartezeit zu beobachten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Frames jeder Priorität nach einer Kollision auf die höchste Prioritätsstufe angehoben werden. Dadurch werden kollidierte Frames niedrigerer Priorität im Anschluss identisch zu den höheren Prioritäten behandelt, wodurch die Wartezeit der Frames höherer Priorität ansteigt.

Da bei der ersten Ausprägung alle kollidierten Frames nach einer Kollision gleich behandelt werden, ist eine weitere Variante denkbar. In Abbildung 5.22 ist dargestellt, dass standardmäßig lediglich die beiden Prioritäten CA0 und CA2 verwendet werden. Tritt eine Kollision bei CA0 Frames auf, wird deren Priorität auf CA1 angehoben. Kollidieren Frames der Priorität CA2, wird deren Priorität auf CA3 geändert. Damit ist sichergestellt, dass die ursprünglichen Prioritätsklassen weiterhin getrennt voneinander behandelt werden. Allerdings sinkt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Prioritätsstufen. Weiterhin spielt die Repriorisierung erst eine Rolle, wenn es bereits zu einer ersten Kollision gekommen ist. Die Wahrscheinlichkeit einer ersten Kollision

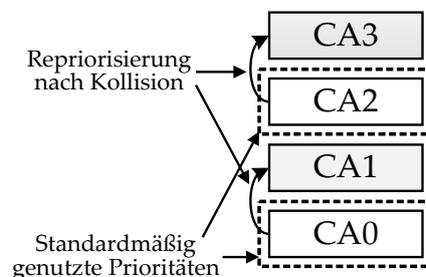


Abbildung 5.22: Dynamische Repriorisierung mit zwei Standardprioritäten

wird nur indirekt beeinflusst, da die Gesamtzahl an Kollisionen reduziert wird. Dadurch wird die Kanalbelegung reduziert, was wiederum zu einer Reduzierung der Kollisionswahrscheinlichkeit beim ersten Übertragungsversuch führt.

Simulationen mit der zweiten Modifikation wurden nicht durchgeführt, da die weitere Reduzierung der Anzahl an standardmäßig nutzbaren Prioritäten nicht zielführend ist. Wird Abbildung 5.21 mit Abbildung 5.15 verglichen, ist zu erkennen, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit bei niedrigeren Verkehrswerten bei Verwendung von vier Prioritätsklassen niedriger ist. Großteils wird ein System in diesem Lastbereich betrieben. Hohe Verkehrswerte treten üblicherweise nur in seltenen Fällen für einen kurzen Zeitraum auf, wie beim Aufstarten des Fahrzeugs oder bei einem Zustandswechsel beispielsweise zwischen *Parken* und *Fahren*.

Basierend auf den Simulationsergebnissen ist festzustellen, dass die dynamische Repriorisierung zumindest mit den Backoffparametern aus dem HomePlug Standard nicht sinnvoll ist. Durch die Reduzierung der Anzahl an standardmäßig nutzbaren Prioritäten steigt die Kollisionswahrscheinlichkeit auch im Bereich niedriger Verkehrswerte, in denen ein System überwiegend betrieben wird. Selbst mit einer Optimierung der Backoffparameter kann dieser Nachteil nicht kompensiert werden.

5.2.6 Fazit

Basierend auf der Abschätzung des aktuellen Verkehrsaufkommens auf der Gesamtheit der LIN-Busse von 600-700 Frames/s (siehe Abschnitt 2.5.3) ist die Verwendung des Green PHY CSMA/CA mit der Übertragung der Nutzdaten in der Frame Control denkbar. Werden den Frames zufällig Prioritäten zugeordnet, liegt die Kollisionsrate bei ca. 1-2% (siehe Abbildung 5.15). Durch die erneuten Übertragungen ist die Wahrscheinlichkeit von Frameverlusten gering. Auch die mittlere Wartezeit der Frames in den jeweiligen Warteschlangen liegt bei Verkehrswerten bis 700 erzeugten Frames pro Sekunde unter 1 ms, was für übliche Funktionen, die über LIN-Busse kommunizieren, ausreichend niedrig ist. Allerdings ist hier auch die maximale Verzögerung zu berücksichtigen. In Tabelle 5.8 sind die Maxima der mittleren sowie der maximalen Wartezeiten aller Simulationsdurchläufe für Verkehrswerte bis einschließlich 700 Frames/s angegeben.

Tabelle 5.8: Wartezeiten bei Verkehrswerten bis 700 Frames/s

Priorität	Mittlere Wartezeit	Maximale Wartezeit
CA0	0,79 ms	51,43 ms
CA1	0,54 ms	28,00 ms
CA2	0,41 ms	17,53 ms
CA3	0,34 ms	9,82 ms

Aus Tabelle 5.8 ist zu entnehmen, dass eine zufällige Vergabe der Prioritäten nur für Funktionen sinnvoll ist, die keine hohen Anforderungen an die maximale Verzögerung haben. Für Funktionen mit Anforderungen an die maximale Verzögerung ist die Priorität fest zu vergeben. Jedoch ist selbst bei fixen Prioritäten nicht garantiert, dass ein Frame überhaupt übertragen wird. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt weitere Protokollvarianten vorgeschlagen und analysiert.

5.3 Modifizierte CarPlug Green PHY Protokolle

Im vorherigen Abschnitt wurde das CSMA/CA Protokoll des Green PHY Standards untersucht. Für den Einsatz im Fahrzeug ist das Protokoll nur bedingt geeignet, da die Kollisionswahrscheinlichkeit mit steigendem Verkehr sowie anwachsender Anzahl an Stationen zunimmt und es dadurch zu Frameverlusten kommen kann. Bezüglich der Diagnose ist ein deterministischer Nachrichtenablauf wünschenswert. Weiterhin ist das CSMA/CA Protokoll für ein anderes Anwendungsgebiet besser geeignet, da damit versucht wird, die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität dezentral für eine unbestimmte Anzahl an Stationen möglichst fair aufzuteilen. Im Fahrzeug dagegen existiert ein abgeschlossenes System, dessen Kommunikationsteilnehmer sowie deren Kommunikationsanforderungen bei der Planung größtenteils bekannt sind. Wichtig ist darauf zu achten, dass später in weiteren Fahrzeuggenerationen hinzukommende Funktionen integriert werden können.

Das Ziel der in diesem Abschnitt vorgeschlagenen Protokolle ist, diese mit bestehender Green PHY Hardware durch geringe Modifikationen realisieren zu können.

5.3.1 TDMA

Um den Protokolloverhead zu reduzieren bietet sich ein TDMA-System an. Durch die feste Vergabe von Zugriffsschlitz für die Übertragung ist vorab bekannt, welche Botschaft wann gesendet wird. Dadurch können Kollisionen ausgeschlossen werden. Auch eine Verwendung von Prioritäten entfällt, da die Prioritäten der Botschaften bei der Vergabe der TDMA-Slots bereits implizit berücksichtigt werden. Der betrachtete Medienzugriff ist in Abbildung 5.23 dargestellt.

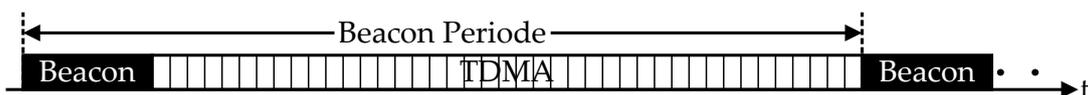


Abbildung 5.23: Beacon Periode mit TDMA Medienzugriff

Der wesentliche Unterschied des neu definierten TDMA-Systems [GKLLK14] im Vergleich zum TDMA des HomePlug Standards [HPA12] ist, dass die Slots eine feste

Dauer besitzen. Im HomePlug Standard dagegen wird die Dauer der TDMA-Slots basierend auf den Reservierungsanforderungen der Stationen dynamisch bestimmt.

Die Nutzdaten werden wie zuvor beschrieben in der HomePlug Frame Control übertragen. Zusätzlich zur Übertragungsdauer für den Frame ist für interne Verarbeitungsschritte ein Interframe Space nötig. Als Interframe Space wird die Dauer des Allocation Interframe Spaces (AIFS) verwendet, welches auch am Ende einer CSMA-Region zwischen dem letzten Acknowledgment und der Beacon Region (siehe Abbildung 4.3, Seite 57) vorhanden ist. Die Dauer des AIFS beträgt 30 μ s. Der Aufbau der TDMA-Slots ist in Abbildung 5.24 dargestellt.

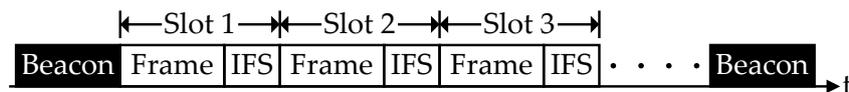


Abbildung 5.24: Aufbau der TDMA-Slots

Mit Hilfe der Dauer der TDMA-Slots kann die Anzahl an verfügbaren Slots pro Beacon Periode bestimmt werden:

$$N_{Slots/BP} = \left\lfloor \frac{T_{Beacon_Periode} - T_{Beacon_Region}}{T_{Frame} + T_{AIFS}} \right\rfloor = 352 \quad (5.8)$$

Diese Anzahl an Slots kann mit den LIN-Bussen verglichen werden, da die Sendezeitpunkte der Frames durch die Schedule-Tabellen ebenfalls vorherbestimmt sind. Auf dem LIN-Bus wird üblicherweise eine Zeitbasis (Time Base) von entweder 5 ms oder 10 ms verwendet. Mit der minimalen Zeitbasis von 5 ms können innerhalb der Dauer einer 50 ms Beacon Periode 10 Frames übertragen werden. Dies bedeutet, dass mit dem hier betrachteten TDMA-System mindestens 35 LIN-Busse ersetzt werden können. Da nicht alle LIN-Busse voll ausgelastet sind und für die Berechnung die minimale Zeitbasis verwendet wurde, kann die tatsächliche Anzahl an LIN-Bussen, die ersetzt werden können, deutlich höher sein.

Bereits heute sind in Fahrzeugen 20-30 LIN-Busse vorhanden. Mit dem vorgeschlagenen TDMA-System ist eine zukünftige Erhöhung des Verkehrs daher nur bedingt möglich. Durch TDMA wird zwar der Overhead bezogen auf einzelne Übertragungen minimiert, jedoch entsteht ein hoher Overhead, falls die Slots nur selten genutzt werden. Die Kommunikation auf der aktuellen LIN-Infrastruktur ist überwiegend ereignisbasiert. Werden die LIN-Busse durch das vorgeschlagene System ersetzt, ist daher zu erwarten, dass der Großteil der TDMA-Slots ungenutzt ist. Für die wenigen periodischen Signale ist TDMA dagegen optimal, da die Sendezeitpunkte der Botschaften vorherbestimmt sind.

Die Slots können entweder den Stationen oder den einzelnen Botschaften zugeordnet werden. Sind die Slots den Stationen zugeteilt, ist sicherzustellen, dass Stationen eine ausreichende Anzahl an Slots erhalten. Alle möglichen Botschaften, die im Worst Case versendet werden, müssen innerhalb ihrer Deadlines übertragen werden.

Wird eine feste Zuteilung von Botschaften zu Slots verwendet, besteht der Nachteil, dass unter Umständen lange auf den nächsten nutzbaren Slot gewartet werden muss. Soll jeder Botschaft ein eigener Slot zugeordnet werden, erstreckt sich ein TDMA-Schedule über mehr als eine Beacon Periode, da die Anzahl an genutzten Nachrichten-IDs höher als die Anzahl der verfügbaren Slots je Beacon Periode ist. Bereits wenn einer Botschaft nur ein Slot pro Beacon Periode zugeordnet wird, ist die Verzögerung im Worst Case im Bereich der Dauer der Beacon Periode. Für Botschaften, die eine harte Obergrenze für die Antwortzeit besitzen, müssen unter Umständen mehrere Slots pro Beacon Periode reserviert werden. Für Funktionen mit niedrigen Anforderungen an die maximale Verzögerung ist es dagegen unter Umständen ausreichend, nur in jeder x -ten Beacon Periode einen Slot zu reservieren. Die Zuteilung der Slots zu den Botschaften kann entweder im Beacon bekannt gegeben werden oder sie ist jedem Knoten vorab bekannt und die Identifizierung der jeweiligen Beacon Periode erfolgt beispielsweise durch eine fortlaufende ID im Beacon selbst.

5.3.2 TDMA mit verkürzten Slots

Das im vorherigen Abschnitt gezeigte TDMA-System hat den Nachteil, dass der Overhead durch die ereignisbasierte Kommunikation und die damit verbundenen ungenutzten Slots vergleichsweise hoch ist. Um die Vorteile von CSMA (Flexibilität) und TDMA (geringer Overhead) zu kombinieren, wird ein weiteres Zugriffsverfahren vorgeschlagen [KGLA]. Ziel ist ein TDMA-System, bei dem der Overhead reduziert wird, der durch ungenutzte Slots entsteht.

Als Basis wird ein TDMA-System definiert, das zusätzlich CSMA verwendet, um die Belegung des Kanals zu überprüfen. Die TDMA-Slots werden jedoch deutlich verkürzt, wodurch ein TDMA-System mit Mini-Slots entsteht. Die Dauer der Slots entspricht nur einem Bruchteil der Übertragungsdauer eines Frames. Die Funktionsweise wird anhand eines Beispiels erläutert: Der Slot, der einer Station bzw. Botschaft zugeordnet ist, wird mit x bezeichnet. Besteht ein Sendewunsch einer Station, der der Slot x zugeordnet ist, muss die Station das Medium im vorherigen Slot ($x-1$) überwachen. Ist dieser Slot frei, darf die Station eine Übertragung in Slot x starten. Diese Übertragung geht zeitlich über die Dauer eines Slots hinaus. Stationen, denen Slots nach Slot x zugeordnet sind, werden durch diese Übertragung blockiert. Ein beispielhafter Nachrichtenablauf ist in Abbildung 5.25 dargestellt.

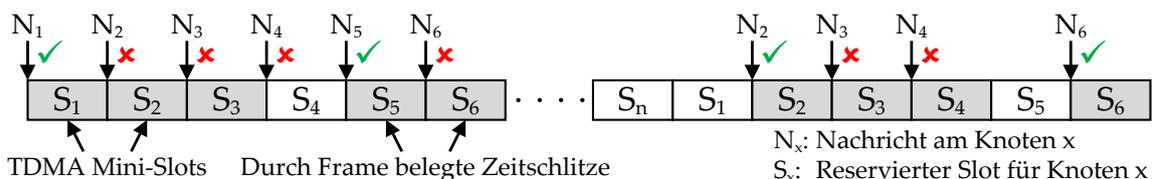


Abbildung 5.25: Beispielhafter Nachrichtenablauf mit TDMA Mini-Slots

In dem Beispiel wird angenommen, dass die Übertragungsdauer eines Frames der Dauer dreier TDMA-Mini-Slots entspricht. Die Station mit Nachricht N_1 darf ihren Slot verwenden, was beispielsweise nach dem Beacon immer der Fall ist. Durch die Übertragung werden die Slots S_1 bis S_3 blockiert. Die Station mit Nachricht N_4 darf den Slot S_4 jedoch nicht verwenden, da der Kanal in S_3 als belegt erkannt wurde. Die Nachricht N_5 kann in S_5 übertragen werden, da der Kanal in S_4 als frei erkannt wurde. Beim nächsten Auftreten des Slots S_2 kann die Nachricht N_2 übertragen werden, da der Kanal im vorangegangenen Slot als frei erkannt wurde.

Die freien Slots, wie beispielsweise der erste Slot S_4 , können für interne Verarbeitungsschritte oder zum Umschalten des Transceivers von Senden auf Empfangen genutzt werden. Eine Unfairness kann mit dem vorgestellten System auftreten, wenn eine Station ihren Slot immer nutzt. Nachfolgende Stationen kommen dadurch nie zum Zuge. Dieser Unfairness kann entgegengewirkt werden, indem die Reihenfolge der Slots von Beacon Periode zu Beacon Periode variiert wird. Alternativ können Regeln aufgestellt werden, dass eine Station beispielsweise mindestens einen eigenen Slot ungenutzt lassen muss, nachdem sie eine Botschaft übertragen hat.

Für periodische Nachrichten kann eine Blockierung vorhergehender Slots erfolgen, um periodischen Nachrichten einen Sendezeitpunkt zu garantieren. In Abbildung 5.26 sind nach Slot S_{x-4} drei Slots blockiert bzw. nicht an Stationen vergeben. Dies stellt sicher, dass der Slot S_x immer genutzt werden kann. In diesem Beispiel sind für periodische Nachrichten jeweils drei Slots vorgesehen. Wie zuvor erwähnt, ist unter Umständen zwischen zwei Frames Zeit für eine interne Verarbeitung vorzuhalten. Dies ist bei der Reservierung der Slots für periodische Nachrichten zu berücksichtigen.

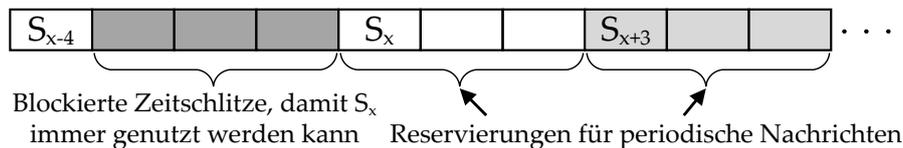


Abbildung 5.26: Reservierung von TDMA-Mini-Slots für periodische Nachrichten

Für den Medienzugriff mit verkürzten TDMA-Slots wird im Folgenden eine Berechnung der zur Verfügung stehenden Slots durchgeführt. Für die Dauer der verkürzten Slots wird die Dauer der Prioritätsauflösungsslots gewählt. Durch einen Frame sind daher 3,09 Slots belegt. Pro 50 ms Beacon Periode stehen maximal 1382 Mini-Slots zur Verfügung, wovon 1379 Slots für Übertragungen genutzt werden können.

Bei einer Übertragung ist der vierte Mini-Slot zu 91% ungenutzt. Ist diese Dauer bereits ausreichend, um zu erkennen ob in dem Mini-Slot eine Übertragung stattfindet, kann der nächste Mini-Slot für eine weitere Übertragung genutzt werden. In diesem Fall können maximal 345 Frames pro Beacon Periode bzw. 6900 Frames/s übertragen werden. Ist ein weiterer Mini-Slot zur Erkennung eines unbelegten Kanals nötig, blockiert eine Übertragung effektiv fünf Mini-Slots. In diesem Fall können maximal 276 Frames pro Beacon Periode bzw. 5440 Frames/s übertragen werden.

Unter Umständen ist es für eine Station nicht möglich, eine Frameübertragung zu einem zufälligen Zeitpunkt während des Aussendens zu erkennen. In diesem Fall müssen Stationen, die ihren Slot nutzen möchten, mehrere vorhergehende Slots auf den Start einer Übertragung prüfen, welcher durch die Präambel identifiziert werden kann.

Durch die Verkürzung der TDMA-Slots kann der Overhead reduziert werden, der durch ungenutzte Slots entsteht. Ist der Großteil der Kommunikation ereignisbasiert, ist dieser Overhead jedoch weiterhin vergleichsweise hoch. Daher wird im folgenden Abschnitt ein weiteres Medienzugriffsverfahren vorgeschlagen.

5.3.3 Prioritätsbasierter Medienzugriff: PR MAC

Die feste Zuteilung von TDMA-Slots ist nicht für eine hohe Anzahl eventbasierter Botschaften geeignet, die teilweise nur selten übertragen werden. Daher wird in diesem Abschnitt ein weiteres Medienzugriffsverfahren vorgeschlagen, das eine Kollisionsauflösung basierend auf Prioritäten verwendet [GKLG14], [KGLc]. Dieser Zugriffsmechanismus wird in ähnlicher Weise auf dem CAN-Bus eingesetzt und meist als CSMA/CR (CSMA with Collision Resolution) bezeichnet. Im Unterschied zum CAN-Bus wird die Zeit zwischen den Beacons in Zugriffsslots fester Länge eingeteilt.

Als Grundlage dient die Prioritätsauflösung des HomePlug Standards. Allerdings wird die Anzahl an Prioritäten deutlich erhöht. Als Prioritäten werden die eindeutigen Nachrichten-IDs verwendet, wodurch Kollisionen vollständig vermieden werden. Da die ID eines Frames bereits während der Prioritätsauflösung übertragen wird, kann das gesamte 12 Byte Variant Field der Frame Control für Nutzdaten verwendet werden. In Abbildung 5.27 ist die Unterteilung in Zugriffsslots sowie deren Aufbau dargestellt. Als Interframe Space wird erneut die Dauer des AIFS verwendet. Die Unterteilung in Zugriffsslots ist nötig, um die Startzeitpunkte der Prioritätsauflösungen zu synchronisieren.

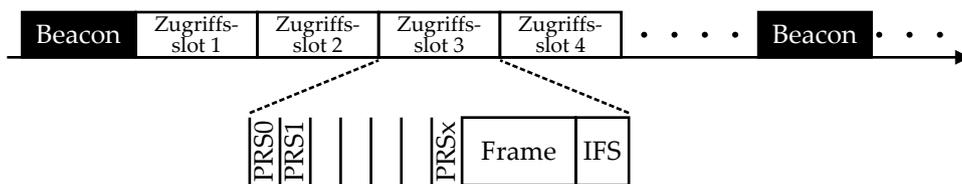


Abbildung 5.27: Prioritätsbasierter Medienzugriff mit Zugriffsslots

Die eindeutigen Nachrichten-IDs werden als Prioritäten verwendet. Daher ist die Anzahl der Prioritätsauflösungsslots so zu wählen, dass auch für zukünftig hinzukommende Funktionen ausreichend Nachrichten-IDs vorgehalten werden. Da der Overhead durch die Prioritätsauflösung erhöht wird, erfolgt ein Vergleich zum Overhead des CSMA/CA Protokolls im kollisionsfreien Fall. Das CSMA/CA Protokoll wird zum Vergleich herangezogen, da dieses im Green PHY Standard bereits enthalten

ist und wie PR MAC die Übertragung einer ereignisbasierten Botschaft prinzipiell jederzeit ermöglicht. Der Overhead aus Gleichung 5.7 (Seite 82) wird für die Berechnung der Anzahl an Prioritätsauflösungsslots (N_{PRS}) verwendet. Der Wert T_{PRS} gibt die Dauer eines Prioritätsauflösungsslots an.

$$N_{PRS} = \frac{T_{Overhead} - T_{AIFS}}{T_{PRS}} = 14.44 \quad (5.9)$$

Das Ergebnis aus Gleichung 5.9 bedeutet, dass der Overhead mit dem prioritätsbasierten Medienzugriff im Vergleich zum kollisionsfreien CSMA/CA Fall bis hin zu 14 Prioritätsauflösungsslots geringer ist. Mit 14 Slots können 16384 Prioritäten realisiert werden. Auf einer bestehenden LIN-Infrastruktur mit bis zu 30 einzelnen LIN-Segmenten stehen aktuell insgesamt bis zu 1920 Nachrichten-IDs zur Verfügung. Nach einer Abschätzung sind von diesen Nachrichten-IDs aktuell lediglich 400-600 genutzt. Basierend auf dieser Abschätzung wird angenommen, dass bereits 4096 Prioritäten auch in Zukunft ausreichend sind, was 12 Prioritätsauflösungsslots entspricht.

In Tabelle 5.9 ist angegeben, wie viele Frames pro Sekunde in Abhängigkeit der Anzahl an Prioritätsauflösungsslots übertragen werden können. In der letzten Spalte ist die prozentuale Dauer des Overheads im Vergleich zum kollisionsfreien CSMA/CA Fall mit mittlerer Backofflänge angegeben. 100% entsprechen dem Overhead aus Gleichung 5.7. Mit 12 Prioritätsauflösungsslots kann der Overhead bereits auf 84% im Vergleich zu CSMA/CA reduziert werden.

Tabelle 5.9: PR MAC: Anzahl der verfügbaren Prioritäten und Frames/s

# PR Slots	Prioritäten	Frames/s	Overhead im Vergleich zu CSMA/CA
12	4096	1720	84,02%
13	8192	1620	90,56%
14	16384	1540	97,11%

Auch ohne die Anzahl an Prioritätsauflösungsslots zu erhöhen, kann die Anzahl der zur Verfügung stehenden Prioritäten erhöht werden. Bei Bildung von Subsystemen kann jedem Subsystem ein Präfix zugeordnet werden, das als Teil der Nachrichten-ID interpretiert werden kann. In Abbildung 5.28 ist ein Beispiel mit zwei Subsystemen dargestellt, die abwechselnd den Zugriffsslots zugeordnet werden. Erhält Subsystem 1 das Präfix „0“ und Subsystem 2 das Präfix „1“, kann das Präfix als zusätzliches Bit der Nachrichten-ID gesehen werden, wodurch sich die Anzahl an IDs verdoppelt. Durch die Bildung weiterer Subsysteme kann die Anzahl an IDs weiter erhöht werden.

Da Stationen in allen Subsystemen kommunizieren können, stellen die Subsysteme keine harte Trennung der Systeme dar. Negativ ist zu erwähnen, dass durch die Unterteilung in Subsysteme die mittlere Verzögerung erhöht wird, da nicht mehr jeder



Abbildung 5.28: PR MAC: Unterteilung in Subsysteme

Zugriffsslot für beliebige Frames genutzt werden kann. Außerdem sollte bei der Vergabe der Nachrichten-IDs darauf geachtet werden, dass das Verkehrsaufkommen in den Subsystemen auf einem vergleichbaren Niveau ist.

Nachträglicher Einstieg in die Prioritätsauflösung

Ist eine Prioritätsauflösung bereits im Gange, kann eine Station mit einer Botschaft höherer Priorität auch nach Beginn der Prioritätsauflösung noch daran teilnehmen. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die auf dem Medium gesendeten PR-Symbole mit denen der Botschaft übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, kann es sonst zu einer Kollision kommen, was anhand eines Beispiels mit 4 Bit Prioritäten im Folgenden gezeigt wird. In Abbildung 5.29 hat Station A eine Prioritätsauflösung für eine Botschaft der Priorität 5 begonnen (höhere Werte entsprechen höherer Priorität). Während des ersten PR-Symbols trifft bei Station B eine Botschaft der Priorität 13 ein, sodass Station B theoretisch ab dem Zeitpunkt T_1 an der Prioritätsauflösung teilnehmen kann. Da Station B anhand des ersten ausgesendeten Bit erkennen kann, dass ihre Botschaft eine höhere Priorität als die derzeit auf dem Kanal bekanntgegebene hat, nimmt sie ab dem Zeitpunkt T_1 an der Prioritätsauflösung teil. In diesem Fall kommt es jedoch nach der Prioritätsauflösung zu einer Kollision der Frames. In dem Beispiel sendet sowohl Station A als auch Station B ihren Frame nach der Prioritätsauflösung aus, da sie keine virtuelle Kollision bei den letzten drei PR-Symbolen erkennen.

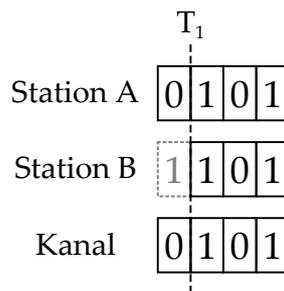


Abbildung 5.29: Kollision bei nachträglichem Einstieg in die Prioritätsauflösung

Sind die IDs sowie die Häufigkeit der Nachrichten gleichverteilt, kann die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, dass eine Station nachträglich in die Prioritätsauflösung einsteigen kann. Mit jedem weiteren PR-Slot halbiert sich die Wahrscheinlichkeit. Nach dem ersten Prioritätsauflösungsslot (PRS0) liegt die Wahrscheinlichkeit bei 50%, nach PRS1 bei 25% usw.

Periode zu reservieren. Die limitierte Anzahl an Slots je Beacon Periode begrenzt daher auch die Anzahl an Funktionen, für die geringe Reaktionszeiten zugesichert werden können.

PR MAC ermöglicht einen dezentralen kollisionsfreien Medienzugriff. Die Zugriffsslots können durch die Prioritätsauflösung prinzipiell für jeden Frame genutzt werden. Durch die Priorisierung wird die Verzögerung der Frames direkt beeinflusst. Dadurch eignet sich PR MAC für den Ersatz der aktuellen LIN-Infrastruktur durch ein PLC-System. Aus diesem Grund wird PR MAC als grundlegender Medienzugriff ausgewählt und in den nächsten Kapiteln weiter untersucht und erweitert. In Kapitel 6 wird der Energieverbrauch bei Verwendung des PR MAC im Detail behandelt und es werden Modifikationen vorgeschlagen, um den Energieverbrauch zu senken. Eine Untersuchung des Echtzeitverhaltens des PR MAC erfolgt in Kapitel 7.

Im nächsten Abschnitt wird zusätzlich aufgezeigt, welche Eigenschaften ein Medienzugriffsprotokoll für den Einsatz im Fahrzeug im Optimalfall aufweisen sollte. Es erfolgt ein Vergleich zu PR MAC, das durch die Optimierung für die ereignisbasierte Kommunikation nicht alle dieser Eigenschaften erfüllt.

5.4 Anforderungen an ein optimiertes Protokoll

Die zuvor vorgestellten Protokollvarianten bauen auf einem bestehenden Standard auf und sind hinsichtlich der Anforderungen im Komfortbereich optimiert. Zu diesen gehört die effiziente Übertragung einer hohen Anzahl unterschiedlicher ereignisbasierter Botschaften, die üblicherweise nur wenige Byte an Nutzdaten transportieren. Basierend auf den Untersuchungen werden im Folgenden die Anforderungen an ein optimiertes Protokoll zusammengefasst, die es auch hinsichtlich weiterer Anwendungsbereiche aufweisen sollte. Der Anforderungsraum besitzt eine Vielzahl an Dimensionen, von denen einige Ziele gegenläufig sind und diese daher nicht gleichzeitig erreicht werden können.

Ein **effizienter Transport bei heterogener Verkehrszusammensetzung** ist besonders in Bezug auf eine zukünftige Erhöhung des Verkehrs wichtig. Der Protokoll-Overhead sollte daher sowohl für periodischen, als auch für ereignisbasierten Verkehr so gering wie möglich sein. Für bestimmte Funktionen müssen **minimale Verzögerungen** bzw. **garantierte Obergrenzen der Verzögerungen** bereitgestellt werden. Für periodischen Verkehr sind deterministische Sendezeitpunkte in der Regel wünschenswert. Die **Skalierbarkeit** ist für eine deutliche Erhöhung der Anzahl an Teilnehmern und Botschaften sicherzustellen. Auch in Fahrzeugen ist davon auszugehen, dass die Größe der zu übertragenden Datenblöcke in Zukunft ansteigt. Daher ist eine **dynamisch anpassbare Nutzdatenlänge** von Vorteil, die auch mehrere hundert Byte umfassen kann. Zusätzlich ist eine **hohe Nutzdatenrate** für den Transport des zukünftigen Verkehrs nötig, um auch Funktionen mit gesteigertem Kommunikationsbedarf zu unterstützen. Des Weiteren ist die **Robustheit** der Übertragung zu maximieren. Sofern Fehler bei

der Übertragung auftreten, sind diese zu erkennen und entsprechend zu behandeln. Weiterhin sind ein **geringer Managementaufwand** und eine **einfache Diagnosemöglichkeit** erstrebenswert, um den Aufwand bzw. die Kosten für die Planung oder das Hinzufügen von Botschaften sowie die Fehlersuche zu minimieren. Zuletzt ist die **Minimierung des Energieverbrauchs** auch durch Mechanismen des Medienzugriffs nötig, damit ein neues System nicht deutlich mehr Energie verbraucht als bestehende Systeme.

Eine Bewertung des PR MAC Protokolls hinsichtlich der genannten Kriterien ist in Tabelle 5.10 gegeben. Anhand der Tabelle ist zu erkennen, dass PR MAC für die Kommunikation im Komfortbereich geeignet ist. Für einige andere Anwendungsbereiche ist das Protokoll allerdings unter Umständen nicht zu verwenden. Um für periodischen Verkehr deterministische Sendezeitpunkte bereitzustellen, ist eine Kombination mit TDMA nötig. In Kapitel 7 wird gezeigt, wie eine Obergrenze der Verzögerung in Abhängigkeit der Priorität der Botschaften bestimmt werden kann. Wird das Variant Field der Frame Control zur Übertragung der Nutzdaten verwendet, ist die maximale Nutzdatenlänge auf 12 Byte limitiert. Beispielsweise im Infotainmentbereich werden oft deutlich längere Frames übertragen. Um neben der LIN-Infrastruktur weitere Bussysteme zu ersetzen, ist eine deutliche Steigerung der Nutzdatenrate nötig. Die Robustheit der Übertragung eines Frames ist bei PR MAC vergleichsweise hoch, da diese redundant ausgesendet wird. Bereits bei Verwendung der Broadcast Tone Mask mit 917 Trägern werden mindestens sieben Kopien der Frame Control übertragen. Die Zuverlässigkeit der Detektion der PR-Symbole in der Prioritätsauflösung ist jedoch entscheidend. Kommt es zu Fehldetektionen, kann es zu Kollisionen bei der Frameübertragung kommen. Da mit dem aktuellen System der erfolgreiche Empfang eines Frames nicht bestätigt wird, können derartige Übertragungsfehler nicht erkannt werden. Weiterhin ist der erwartete Energieverbrauch eines PLC-Systems vergleichsweise hoch. Aus diesem Grund werden in Kapitel 6 Modifikationen vorgeschlagen, um den Energieverbrauch auch auf MAC-Ebene zu senken.

Die Optimierung eines Protokolls kann nicht hinsichtlich aller Ziele erfolgen, da beispielsweise ein minimaler Energieverbrauch nicht gleichzeitig mit minimalen Verzögerungen erreicht werden kann. Transceiver müssen in eine Art Schlafmodus versetzt werden, um Energie zu sparen. Die Lösung kann ein adaptives Protokoll sein, durch welches der Optimierungsschwerpunkt je nach Betriebszustand verlagert wird. Ist beispielsweise die Auslastung gering, kann der Energieverbrauch durch eine zeitweise Abschaltung gesenkt werden. Ist die Last dagegen hoch, liegt der Fokus auf der effizienten Übertragung mit geringer Verzögerung. Entweder passt sich das Protokoll selbst dynamisch an die aktuellen Anforderungen an oder es erfolgt eine manuelle Anpassung der Protokollparameter.

Durch eine Kombination verschiedener Verfahren, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, können die jeweiligen Vorteile zusammengeführt werden. Für periodischen Verkehr wird TDMA bevorzugt, um deterministische Sendezeitpunkte bereitzustellen und den Overhead zu minimieren. Zwischen den TDMA-Bereichen ist ein

Tabelle 5.10: Bewertung des PR MAC Protokolls

Kriterium	PR MAC
Unterstützung für eventbasierten Verkehr	Übertragung durch die kollisionsfreie Prioritätsauflösung jederzeit möglich
Unterstützung für periodischen Verkehr	Keine deterministischen Sendezeitpunkte (durch Kombination mit TDMA möglich)
Obergrenze der Verzögerung	Beeinflussung durch Priorität; deterministische Sendezeitpunkte durch Kombination mit TDMA; Untersuchung des Echtzeitverhaltens in Kapitel 7
Skalierbarkeit	Limitierung lediglich durch Anzahl an PR-Slots/Prioritäten
Nutzdatenlänge	Maximal 12 Byte bei Verwendung des Variant Fields in der Frame Control
Nutzdatenrate	Gering im Vergleich zu Bussystemen wie CAN oder FlexRay (bei 12 PRS maximal 1720 Frames/s)
Robustheit	Redundante Aussendung der Frame Control; Detektion der PR-Symbole entscheidend; Keine Bestätigung durch Empfänger
Managementaufwand	Prioritätsreihenfolge entscheidend (siehe Kapitel 7)
Diagnosemöglichkeit	Gut durch Bussystem mit festen Nachrichtenprioritäten
Energieverbrauch	Erwarteter Verbrauch vergleichsweise hoch; Möglichkeiten zur Verbesserung in Kapitel 6

Medienzugriffsverfahren wünschenswert, das den Stationen ohne eine zentrale Koordinierung prinzipiell jederzeit eine Übertragung ermöglicht. Besonders bei einer hohen Anzahl an Stationen ist ein kollisionsfreier Zugriff erwünscht. Für ein abgeschlossenes System mit bekannten Botschaften ist ein prioritätsbasierter Medienzugriff geeignet. Optimierungspotential bietet die Prioritätsauflösung, welche so kurz wie möglich sein sollte. Beispielsweise durch orthogonale Prioritätsauflösungssignale kann während der Dauer eines PR-Symbols mehr als ein Bit an Information übertragen werden. Allerdings muss dabei die zuverlässige Detektion sichergestellt sein.

Generell ist festzustellen, dass eine Optimierung stets nur für ein ausgewähltes Anwendungsgebiet und die damit verbundenen Anforderungen durchgeführt werden kann. Ein Protokoll, das für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen optimiert ist, stellt stets einen Trade-off verschiedener Optimierungsziele dar.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der HomePlug Green PHY Standard für den Einsatz im Fahrzeug genauer betrachtet. Zunächst wurde die Übertragung der LIN-Frames über Green PHY untersucht. Durch die Master-Slave-Kommunikation des LIN-Protokolls ist der Overhead jedoch vergleichsweise hoch. Durch die Anpassung der PHY Block Size und der UART-Datenrate können LIN-Frames zwar übertragen werden, jedoch ist eine Ersetzung der kompletten LIN-Infrastruktur nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Overheads ist die Übertragung der Nutzdaten in der Frame Control. Simulationen mit dieser Modifikation zeigen, dass der in Abschnitt 2.5.3 bestimmte Worst-Case-LIN-Verkehr eines heutigen Gesamtfahrzeugs mit Hilfe des HomePlug CSMA/CA Protokolls übertragen werden kann. Durch die Verwendung der Prioritäten kann die Kollisionswahrscheinlichkeit reduziert werden. Außerdem kann dadurch die mittlere und maximale Verzögerung der Frames beeinflusst werden. Mit Hilfe einer dynamischen Repriorisierung kann die Wahrscheinlichkeit von weiteren Kollisionen verringert werden. Allerdings wird dadurch die Anzahl standardmäßig nutzbarer Prioritätsstufen reduziert. Weiterhin kann selbst mit Bestätigungen nicht ausgeschlossen werden, dass ein Frame nach mehreren Kollisionen verworfen wird.

Daher wurden weitere Protokollvarianten vorgeschlagen und untersucht, die soweit möglich auf den HomePlug Standard aufbauen bzw. mit Modifikationen realisierbar sind. Zum einen wurde ein TDMA-System, zum anderen ein prioritätsbasierter Medienzugriff betrachtet.

Mit einem TDMA-System wird der Overhead bezogen auf einzelne Übertragungen minimiert. Für einen hohen Anteil an ereignisbasierter Kommunikation sind jedoch viele der Slots ungenutzt. Da die LIN-Busse durch das Polling einen vergleichbaren Medienzugriff besitzen, erfolgte ein direkter Vergleich. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass mit den gegebenen Parametern mindestens 35 LIN-Busse ersetzt werden können. Allerdings ist das System nicht für eine deutliche zukünftige Erhöhung des Verkehrs geeignet. Um den Overhead für die ereignisbasierte Kommunikation zu verringern, wurde ein TDMA-System mit verkürzten Slots vorgestellt. Jedoch sind die feste Zuteilung der Botschaften oder Stationen zu den einzelnen Slots sowie die mögliche Ungerechtigkeit durch belegte Slots als Nachteil zu nennen.

Durch einen prioritätsbasierten Medienzugriff (PR MAC) wird ein dezentraler kollisionsfreier Kanalzugriff ermöglicht. Im Vergleich zum kollisionsfreien CSMA/CA Fall, bei dem nur eine Station sendet, kann der Overhead verringert werden. Bereits 12 PR-Slots, mit denen 4096 Prioritäten realisiert werden können, erscheinen selbst für eine zukünftige Verkehrserhöhung als ausreichend. Bei Bedarf kann die Anzahl an IDs durch die Verwendung von Subsystemen weiter erhöht werden, ohne den Overhead zu vergrößern. Durch die Übermittlung der Nachrichten-ID während der Prioritätsauflösung steht das gesamte Variant Field der Frame Control für Nutzdaten zur

Verfügung, wodurch je Frame bis zu 12 Byte an Nutzdaten übertragen werden können. Wird PR MAC durch Anpassungen der HomePlug Green PHY Firmware sowie Hardware in bestehende Lösungen integriert, entsteht der im Namen dieses Kapitels definierte **CarPlug** Green PHY. Idealerweise werden die nötigen Anpassungen zusätzlich in bestehende Hardware integriert, wodurch die Kosten durch hohe Stückzahlen reduziert werden können. Das Resultat ist ein Home- and CarPlug Green PHY, der je nach Einsatzgebiet entsprechend konfiguriert wird.

Zusätzlich wurde die Kombination der Verfahren diskutiert, um die jeweiligen Vorteile zu vereinen. Für periodischen Verkehr können Sendezeitpunkte durch die Vergabe von TDMA-Slots fest vorgegeben und der Overhead für diese Botschaften minimiert werden. Die restliche Zeit kann für die kollisionsfreie Übertragung ereignisbasierter Botschaften mittels PR MAC genutzt werden.

Zuletzt wurden die Anforderungen an ein optimiertes Protokoll erläutert. Für den Einsatz im Fahrzeug ist ein Protokoll erstrebenswert, welches durch die Anpassung von Parametern auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmt werden kann oder diese Anpassung selbst dynamisch vornimmt. Diese Konfiguration kann beispielsweise einmalig bei der Fertigung im Werk vorgenommen werden oder es erfolgt eine dynamische Anpassung an den aktuellen Fahrzeugzustand im laufenden Betrieb.

6 Energieeffizienz

Eine Kerneigenschaft der Powerline-Kommunikation ist, dass die Geräte stets direkt mit der Stromversorgung verbunden sind. Aus diesem Grund steht die Energieeffizienz bei der Entwicklung der Produkte gerade im häuslichen Umfeld meist nicht an vorderster Stelle. Im Fahrzeug ist die PLC-Hardware zwar auch direkt mit der Stromversorgung verbunden, allerdings wirkt sich dort ein erhöhter Energieverbrauch der Komponenten direkt auf den Kraftstoffverbrauch, die CO₂-Emission und die Reichweite aus. Daher ist die Energieeffizienz beim Design von Fahrzeugkomponenten unbedingt zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Abschätzung des Energieverbrauchs vorhandener PLC-Transceiver. Da die LIN-Infrastruktur durch PLC ersetzt werden soll, wird zusätzlich eine Abschätzung des Energieverbrauchs der LIN-Transceiver gegeben. Darauf folgend werden Protokollvarianten des prioritätsbasierten Medienzugriffs vorgeschlagen, die den Energieverbrauch auf MAC-Ebene durch Schlafzyklen senken.

6.1 Abschätzung des Energiebedarfs

Der tatsächliche Energieverbrauch verschiedener Transceiver kann anhand der Datenblätter nicht direkt abgelesen werden, da er vom aktuellen Betriebszustand abhängt. Gerade bei PLC-Transceivern ist es schwierig, verlässliche Werte zu erhalten. In vielen Datenblättern verfügbarer Produkte sind keine Angaben zum Energieverbrauch zu finden.

In einem Datenblatt der MegaChips Corporation zum PLC Integrated Circuit (IC) KHN13200 [KHN12], der die Standards IEEE 1901 sowie HD-PLC implementiert, sind Werte für den vollen Betrieb sowie für einen Energiesparmodus gegeben. Im vollen Betrieb liegt der Energieverbrauch bei 0,4 W, im Energiesparmodus sinkt der Verbrauch auf 0,07 W. Es wird jedoch nicht erläutert, wie der Energiesparmodus definiert ist. In einer Ankündigung von Broadcom zum HomePlug AV bzw. IEEE 1901 Chip BCM60321 [BCM11] wird mit „Low Power Consumption“ geworben. Das Modem verbraucht laut Angabe „weniger als 2,5 W“ im eingeschalteten Zustand und „weniger als 0,5 W“ im Stand-by. Diese Werte liegen weit über den Werten, die MegaChips zu ihrem IC angeben. Für die Abschätzung werden daher die Werte des sparsameren KHN13200 herangezogen.

Die niedrigsten Verbrauchswerte von LIN-Transceivern wurden bei Produkten von NXP gefunden. Zum Transceiver TJA1020 sind im Datenblatt [TJA04] im Stand-by sowie bei rezessivem Bus-Pegel 4,8 mW angegeben. Bei dominantem Pegel steigt der Wert auf 42 mW.

Wird der Energiesparmodus des KHN13200 mit dem Stand-by-Wert des TJA1020 verglichen, ergibt sich für den PLC-Transceiver ein 14,5-facher Energieverbrauch. Werden die Maximalwerte verglichen, ergibt sich ein Verhältnis von 1:9,5 (LIN zu PLC). Interessant ist jedoch vor allem der Vergleich des Energieverbrauchs im Betrieb. Dieser variiert unter Umständen stark in Abhängigkeit der Kanalauslastung.

Die Abschätzung des Energieverbrauchs für einen PLC-Transceiver basiert im Folgenden auf dem in Abschnitt 5.3.3 vorgestellten PR MAC. Der wesentliche Unterschied zum CSMA/CA Protokoll des HomePlug Standards ist, dass die PLC-Transceiver bei PR MAC nicht ununterbrochen aktiv sein müssen. Für die Betrachtung der Energieeffizienz werden zwei Fälle unterschieden. Im Best Case ist der Transceiver nur während des Beacons und der Prioritätsauflösungen aktiv. Die restliche Zeit befindet sich der Transceiver im Energiesparmodus. Im Worst Case dagegen ist der Transceiver zusätzlich auch in jedem Zugriffsslot während des Empfangs von Frames aktiv. Es wird von 12 Prioritätsauflösungsslots ausgegangen, wodurch in einer 50 ms Beacon Periode 86 Frames übertragen werden können. Im Best Case liegt der Energieverbrauch damit bei 317 mW, im Worst Case bei 380 mW. In einem realen Szenario wird der Verbrauch zwischen diesen beiden Werten liegen.

Bei einem LIN-Transceiver hängt der Energieverbrauch davon ab, ob der Knoten nur empfängt oder ob Frames ausgesendet werden. Geht man beim Senden eines LIN-Transceivers von 50% dominanten und 50% rezessiven Pegeln aus, ergibt sich ein Mittelwert von 23,4 mW. Beim reinen Empfang sinkt der Energieverbrauch auf das Minimum von 4,8 mW. Das Verhältnis des Energieverbrauchs von LIN zu PLC liegt damit beim Senden bei 1:13,5 bis 1:16, beim reinen Empfang bei 1:66 bis 1:79.

Die angegebenen Werte stellen lediglich eine erste Abschätzung dar. Je nach Hersteller und Implementierung kann der Energieverbrauch signifikant von den hier genannten Werten abweichen. Außerdem konnten keine Werte für einen HomePlug Green PHY Chip in Erfahrung gebracht werden. Dieser kann durch die vereinfachte Hardware einen deutlich geringeren Energiebedarf aufweisen. Durch die Betrachtung verfügbarer Datenblätter ist jedoch zu erwarten, dass der Energieverbrauch der PLC-Hardware über dem der LIN-Transceiver liegt. Die Energieeffizienz ist daher auch auf der MAC-Schicht zu berücksichtigen.

6.2 Energieeffiziente MAC Protokolle

Der erwartete Energieverbrauch eines PLC-Systems liegt deutlich über dem der aktuellen LIN-Infrastruktur. Die Energieeffizienz von Fahrzeugkomponenten ist wichtig, um den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emission eines Fahrzeugs zu minimieren.

Die Einsparung der LIN-Leitungen wirkt sich ebenfalls positiv aus, kann jedoch aufgrund fehlender Daten an dieser Stelle nicht im Vergleich des Energieverbrauchs berücksichtigt werden.

Zunächst ist der Energieverbrauch auf der physikalischen Schicht zu minimieren. Dazu ist der Sendepegel an den tatsächlichen Bedarf anzupassen. Auch auf anderen Ebenen kann ein Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs geleistet werden. In diesem Abschnitt werden Modifikationen des prioritätsbasierten Zugriffs (PR MAC) diskutiert [GDK⁺14]. Das Ziel ist die Zeit zu erhöhen, welche sich die Transceiver im Energiesparmodus befinden. Um die Auswirkungen auf die Verzögerung und den maximalen Durchsatz zu bewerten, werden Simulationsergebnisse präsentiert. Für die Simulation wurde das in Abschnitt 5.2.1 vorgestellte Framework erweitert.

6.2.1 PR MAC mit Ankündigungsslot: PR+ MAC

Die Transceiver sind bei Verwendung des PR MAC während der Prioritätsauflösung stets aktiv, da jederzeit ein Frame eintreffen kann. Wird der eigentlichen Prioritätsauflösung ein weiterer Slot vorangestellt, können Stationen die Teilnahme an der Prioritätsauflösung bekannt geben. In Abbildung 6.1 ist PR MAC mit einem zusätzlichen Ankündigungsslot IND dargestellt. Der Ankündigungsslot ist vergleichbar zum IN-USE Slot des G.hn Standards (siehe Abschnitt 4.2.2). Das Verfahren wird im Folgenden als PR+ MAC bezeichnet. Falls keine der Stationen einen Frame zu senden hat, wird dies durch das Ausbleiben eines Signals im Ankündigungsslot erkannt. In diesem Fall können alle Stationen bis zum Beginn des nächsten Zugriffsslots in einen Energiesparmodus übergehen.

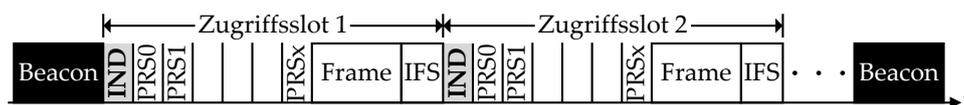


Abbildung 6.1: PR MAC mit Ankündigungsslot (PR+ MAC)

Bei niedrigem Verkehrsaufkommen sind viele Zugriffsslots ungenutzt, sodass sich die Stationen oftmals direkt nach dem Ankündigungsslot im Energiesparmodus befinden. Ist die Kanalauslastung dagegen hoch, macht sich der Overhead des zusätzlichen Slots bemerkbar, wodurch die maximale Anzahl an Frames sinkt, die pro Beacon Periode übertragen werden können.

6.2.2 PR MAC mit rotierendem Präfix: Rot MAC

Eine weitere Variation des PR MAC wurde in Abschnitt 5.3.3 vorgestellt. In Abbildung 5.28 (Seite 100) ist eine Unterteilung in Subsysteme dargestellt. Durch die Unterteilung müssen Stationen nur in Subsystemen aktiv sein, in denen sie Frames erwarten. Im Falle von zwei Subsystemen kann eine Station, die nur Frames aus einem der

beiden Subsysteme erwartet, ihren Transceiver in jedem zweiten Zugriffsslot in den Energiesparmodus versetzen. Außerdem wird der Overhead reduziert, da die Prioritätsauflösung verkürzt wird. Da die Präfixe der Subsysteme durchrotieren, wird das Medienzugriffsverfahren als Rot x bezeichnet. Der Wert x gibt an, wie viele Subsysteme vorhanden sind. Ein System mit zwei Subsystemen wird daher als Rot 2 bezeichnet. Durch die Bildung weiterer Subsysteme kann die Dauer erhöht werden, die eine Station im Energiesparmodus verbringt, sofern die Station nur Frames eines Subsystems benötigt.

6.2.3 Hierarchischer Medienzugriff

Durch ein hierarchisches Zugriffsverfahren kann die Einschaltdauer der Transceiver ebenfalls reduziert werden. Die Zeit zwischen den Beacons wird in Sektionen aufgeteilt. Innerhalb der Sektionen wird die Prioritätsauflösung in zwei Teilen ausgeführt. Die Struktur des Medienzugriffs ist in Abbildung 6.2 dargestellt. In der ersten Stufe der Prioritätsauflösung (PR1) wird das Präfix aufgelöst. Die Anzahl der Slots in PR1 entspricht dabei der Anzahl der vorhandenen Präfixe. Jedes Präfix wird einem der Slots in PR1 zugeordnet. Im Folgenden wird ein Beispiel mit einer Präfixlänge von zwei Bit gegeben. Mit dieser Präfixlänge können die vier Präfixe 0b00, 0b01, 0b10 und 0b11 gebildet werden. PR1 besteht daher insgesamt aus vier Slots. Da höhere Präfixe höhere Prioritäten repräsentieren, wird das Präfix 0b11 dem ersten Slot in PR1 zugeordnet, 0b10 dem zweiten Slot usw. Will eine Station beispielsweise einen Frame mit Präfix 0b01 übertragen, sendet sie ein PR-Symbol im dritten PR1-Slot aus. Nach PR1 ist allen Stationen im Netz bekannt, für welche Präfixe im zweiten Teil der Sektion Frames übertragen werden. Die restlichen Bit der Nachrichten-ID werden im zweiten Abschnitt der Prioritätsauflösung (PR2) aufgelöst.

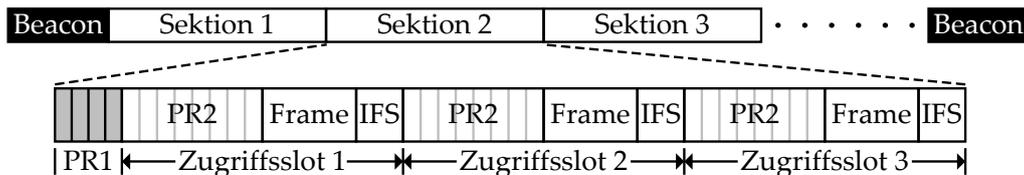


Abbildung 6.2: Hierarchischer Medienzugriff

Der zweite Teil der Sektion besteht aus mehreren Zugriffsslots. Die Anzahl der Zugriffsslots ist kleiner oder gleich der Anzahl an Präfixen. Die Zuteilung zwischen den Zugriffsslots und den Prioritätsauflösungsslots in PR1 ist dabei nicht fix. Werden beispielsweise in PR1 PR-Symbole im zweiten und vierten Slot ausgesendet (entspricht den Präfixen 0b10 und 0b00), wird der erste Zugriffsslot der Sektion für das Präfix 0b10 verwendet, der zweite für das Präfix 0b00. Falls die Anzahl an Zugriffsslots geringer als die Anzahl der Präfixe ist, kann es vorkommen, dass niederpriorer Verkehr nicht immer einen Zugriffsslot in einer Sektion erhält. Im Beispiel in Abbildung 6.2 gibt es vier Präfixe, jedoch nur drei Zugriffsslots je Sektion. Werden die ersten drei

Präfixe (0b11, 0b10 und 0b01) genutzt, besteht für das Präfix 0b00 keine Übertragungsmöglichkeit in der entsprechenden Sektion. Dieser Effekt kann vermieden werden, wenn die Anzahl der Zugriffsslots gleich der Anzahl der Präfixe gewählt wird. In diesem Fall kann das System als Medienzugriff mit rotierendem Präfix und zusätzlichem Ankündigungsslot gesehen werden.

Der Energieverbrauch wird durch das hierarchische Verfahren gesenkt, da Stationen zunächst nur in PR1 aktiv sind. Wird ein Signal in PR1 erkannt, ist den Stationen bekannt, wann ein Frame für das entsprechende Präfix übertragen wird. In diesem Fall sind die Stationen im zweiten Abschnitt der Prioritätsauflösung (PR2) im entsprechenden Zugriffsslot ebenfalls aktiv.

Der hierarchische Medienzugriff wird wie folgt bezeichnet: H X_Y wobei X der Anzahl an Präfixen und Y der Anzahl an Zugriffsslots je Sektion entspricht.

6.3 Untersuchung der modifizierten Protokolle

Um die Protokolle zu vergleichen, werden verschiedene Aspekte untersucht. Zunächst wird der maximale Durchsatz in Frames pro Sekunde betrachtet, der sich unter Einhaltung der Deadlines ergibt. Dazu werden drei Verkehrsklassen mit Deadlines definiert. In Tabelle 6.1 sind die drei Klassen angegeben sowie drei Szenarien definiert, die sich aus den angegebenen Anteilen der drei Klassen zusammensetzen.

Tabelle 6.1: Szenarien mit Verkehrsklassen und Deadlines

Klasse	Deadline	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
A	50 ms	25%	45%	65%
B	100 ms	65%	45%	25%
C	250 ms	10%	10%	10%

Verkehr der Klasse A repräsentiert Funktionen, bei denen der Bediener in der Regel eine direkte Rückmeldung des Systems erwartet. Ein Beispiel für Klasse A Verkehr ist der Fensterheber oder die elektrische Spiegelverstellung. Die Deadline von Klasse B ist etwas verlängert und Klasse C repräsentiert Hintergrundverkehr mit einer Deadline von 250 ms, bei dem keine unverzügliche Rückmeldung des Systems benötigt wird. Für alle drei Szenarien wird angenommen, dass der Anteil an Klasse C Verkehr bei 10% liegt. Mit zunehmender Szenario-ID steigt der Anteil an Verkehr mit kürzerer Deadline (Klasse A).

Zunächst wird bestimmt, wie hoch der maximale Durchsatz unter Einhaltung der Deadlines für die drei Szenarien ist. Da alle Protokollvarianten eine zusätzliche Verzögerung verursachen, werden Simulationsergebnisse der mittleren Verzögerung in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens präsentiert. Es wird bestimmt, bis zu welchem Verkehrsaufkommen die Deadlines noch eingehalten werden können. Im Anschluss wird der Energieverbrauch der Verfahren verglichen.

Für die Untersuchung des ereignisbasierten Verkehrs werden Simulationen mit den zuvor vorgestellten Szenarien durchgeführt. Der Ankunftsprozess wird mit Hilfe einer Exponentialverteilung modelliert. Die Zwischenankunftszeit (λ^{-1}) wird in der Simulation in Schritten von $20 \mu\text{s}$ reduziert. Weiterhin wird ein fehlerfreier physikalischer Kanal angenommen.

In der Regel wird der LIN-Bus nicht für sicherheitskritische Funktionen verwendet. Aus diesem Grund werden die Deadlines nicht als hart angenommen. Für die vorliegende Untersuchung reicht es daher aus, dass 99% der Botschaften (99% Quantil) innerhalb ihrer Deadline übertragen werden.

6.3.1 Maximaler Durchsatz

Je nach Protokollvariante variiert der Overhead. Aus diesem Grund wird der maximale Durchsatz bestimmt, bei dem keines der 99% Quantile der drei Verkehrsklassen ihre Deadline verletzen. Als Vergleich ist der unmodifizierte prioritätsbasierte Medienzugriff (PR MAC) angegeben. In Abbildung 6.3 sind neben PR MAC auch die Ergebnisse für PR+ und Rot MAC angegeben.

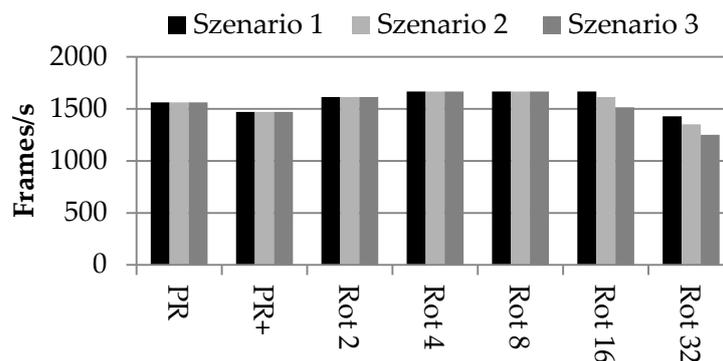


Abbildung 6.3: Maximaler 99% Quantil Durchsatz für PR, PR+ und Rot MAC

Das unmodifizierte PR MAC kann unabhängig vom Szenario 1560 Frames pro Sekunde transportieren, ohne die Deadlines zu verletzen. Da bei PR+ MAC durch den zusätzlichen Ankündigungsslot der Overhead vergrößert wird, sinkt der maximale Durchsatz. Die Zugriffsverfahren mit rotierendem Präfix verringern den Overhead, wodurch sich der Durchsatz erhöht. Ab einer Anzahl von 16 Subsystemen kann jedoch beobachtet werden, dass der Durchsatz sinkt. Dies lässt sich durch die hohe Anzahl an Subsystemen erklären. Im Fall des Rot 32 kann beispielsweise für ein bestimmtes Präfix lediglich jeder 32. Zugriffsslot verwendet werden. Dadurch wird die mittlere Verzögerung deutlich erhöht, wodurch die Deadlines früher verletzt werden. Dieser Effekt wird im nächsten Abschnitt mit der Untersuchung der Verzögerungen genauer betrachtet.

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse für ausgewählte Konfigurationen des hierarchischen Medienzugriffs dargestellt. Wie auch bei Rot MAC kann der Overhead mit bestimmten Konfigurationen des hierarchischen Medienzugriffs reduziert werden, wodurch sich der maximale Durchsatz erhöht. Allerdings ist den Präfixen mit niedriger Priorität bei vielen Konfigurationen nicht immer ein Zugriffsslot garantiert. Eine Möglichkeit wäre, diesen Präfixen seltene Frames wie z.B. für Diagnose zuzuordnen, die im Hintergrund übertragen werden können.

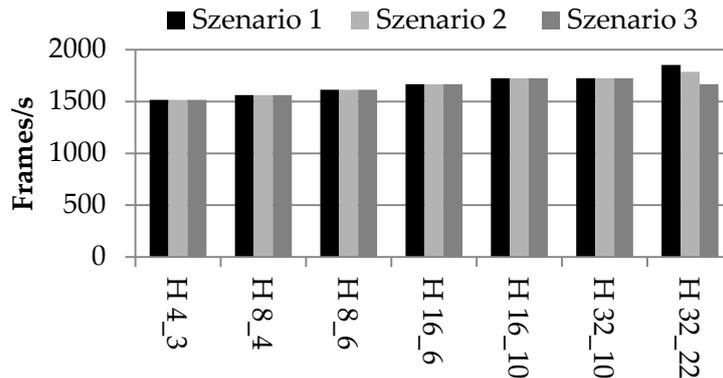


Abbildung 6.4: Maximaler 99% Quantil Durchsatz des hierarchischen Medienzugriffs

6.3.2 Verzögerung

Da die Verfahren die mittlere Verzögerung der Frames erhöhen, werden in diesem Abschnitt die Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des erzeugten Verkehrs präsentiert. Es werden nur die Ergebnisse für das dritte Szenario vorgestellt, da dieses die striktesten Anforderungen an die maximal zulässige Verzögerung stellt.

In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse für PR und PR+ MAC dargestellt. Die Unterschiede sind gering, da bei PR+ lediglich ein weiterer Slot vor der Prioritätsauflösung hinzugefügt wird. Außerdem können die Stationen bei PR+ MAC jeden Zugriffsslot für beliebige Frames verwenden, wodurch die Verzögerung nicht weiter erhöht wird. Es ist zu erkennen, dass die Verzögerung des Klasse A Verkehrs immer deutlich unter der Deadline liegt. Die Legende aus Abbildung 6.5 ist auch für die Abbildungen 6.6 und 6.7 gültig.

In Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse für das Medienzugriffsverfahren mit rotierendem Präfix dargestellt. Ergebnisse für Rot MAC mit 32 Subsystemen sind nicht dargestellt, da eine Unterteilung des Systems in 32 Präfixe als nicht sinnvoll für den Einsatz im Fahrzeug erachtet wird. Jede weitere Unterteilung reduziert die Gesamtleistungsfähigkeit des Systems, da die Auslastung der Subsysteme nicht so gewählt werden kann, dass diese gleichverteilt ist. Der Bündelungsgewinn geht mit der Unterteilung in Subsysteme verloren. Ein weiterer Effekt kann bei Betrachtung der Ergebnisse beobachtet werden. Während bei Rot 2 und Rot 4 die Deadline für Klasse C Verkehr mit zunehmender Ankunftsrate als erstes verletzt wird, verletzt bei Rot 16 der Klasse B

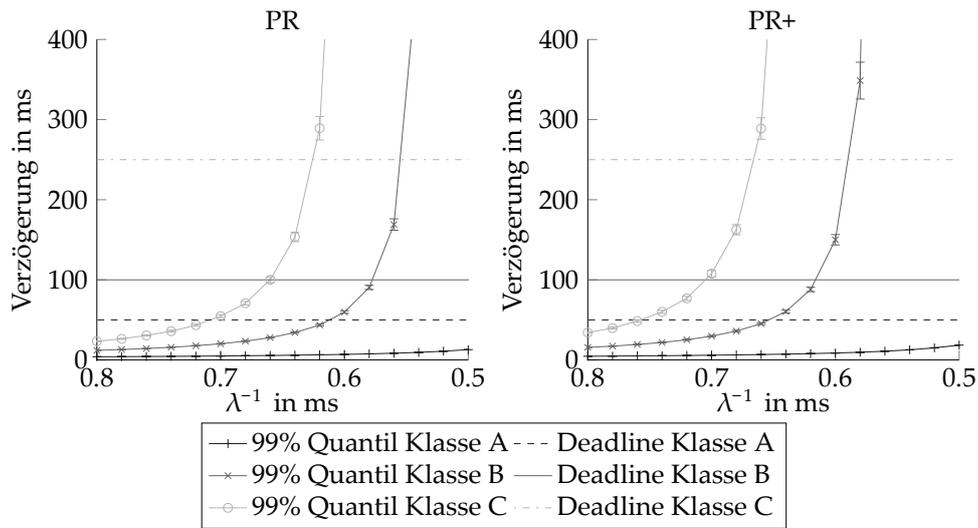


Abbildung 6.5: 99% Quantil Verzögerung bei PR und PR+ MAC

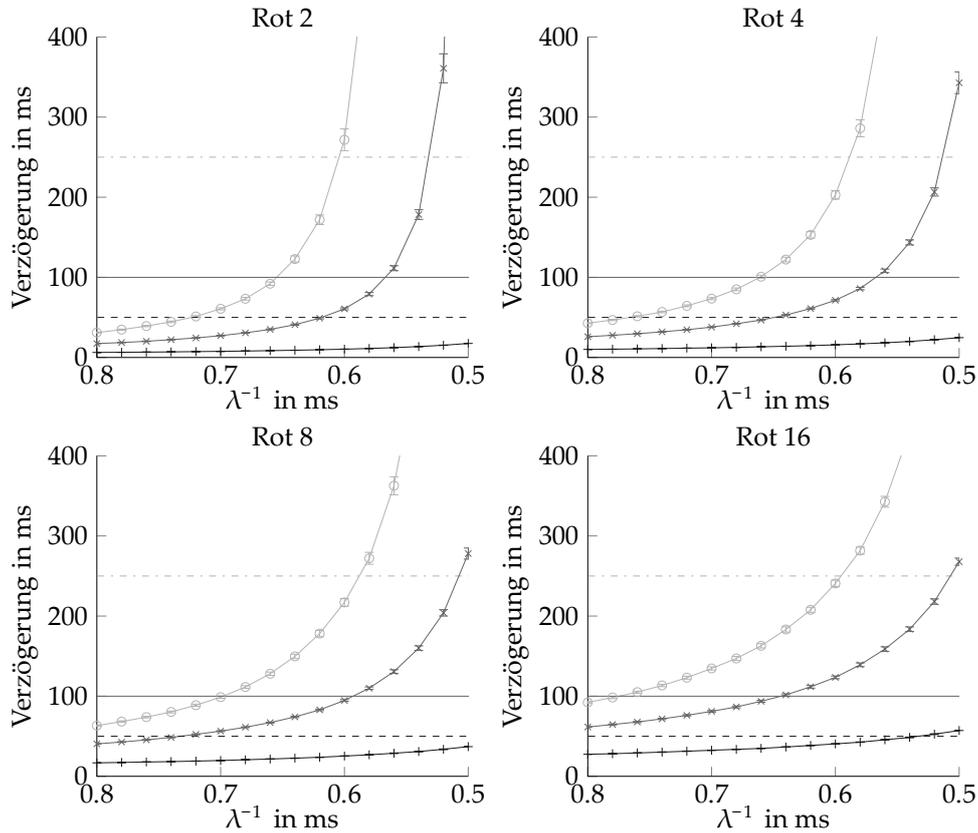


Abbildung 6.6: 99% Quantil Verzögerung bei Rot MAC

Verkehr seine Deadline zuerst. Dieses Verhalten ist nicht erwünscht, da höherpriorer Verkehr seine Deadline nicht vor niederpriorem Verkehr verletzen sollte. Bei Rot 8 verletzen Klasse B und C in etwa bei gleicher Ankunftsrate ihre Deadlines.

Abbildung 6.7 zeigt die Simulationsergebnisse für das hierarchische Medienzugriffsverfahren. Exemplarisch wurden vier Konfigurationen ausgewählt. In Abbildung 6.4 ist zu sehen, dass der maximale Durchsatz bei H 4_3 geringer als mit PR MAC ist. In Abbildung 6.7 ist zu erkennen, dass bei H 4_3 der Klasse C Verkehr bereits bei einer vergleichsweise niedrigen Ankunftsrate seine Deadline verletzt. Dies kann durch die Aufteilung der IDs auf die Präfixe erklärt werden. Durch vier Präfixe wird der Adressraum in vier Teile aufgeteilt. Da nur 10% des Verkehrs der Klasse C angehört, liegen alle IDs der Klasse C im Bereich des vierten Präfixes. Dieses Präfix hat jedoch bei H 4_3 keinen garantierten Zugriffsslot. Nur wenn in mindestens einem der höherpriorigen Präfixe kein Frame übertragen wird, besteht eine Übertragungsmöglichkeit für das vierte Präfix. Die mittlere Verzögerung wird dadurch deutlich erhöht. Bei H 32_22 kann wie auch bei Rot 16 beobachtet werden, dass Klasse B Verkehr seine Deadline vor Klasse C verletzt.

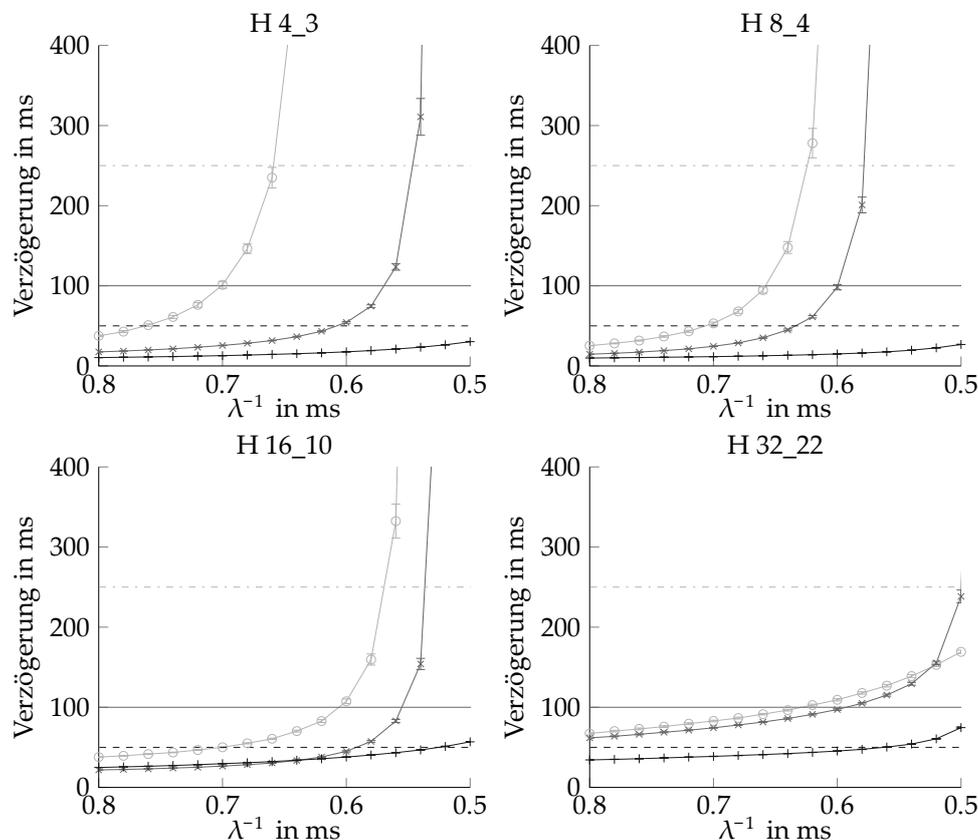


Abbildung 6.7: 99% Quantil Verzögerung bei hierarchischem Medienzugriff

6.3.3 Energieverbrauch

Für den Vergleich des Energieverbrauchs ist der Energieverbrauch beim Aussenden von Frames zu vernachlässigen, da Stationen in diesem Fall nur aktiv sind, wenn sie einen auszusendenden Frame in ihrer Warteschlange haben. Der Energieverbrauch

während eine Station auf einen Frame wartet ist dagegen von Interesse, da eine Station nicht wissen kann, wann eine ereignisbasierte Botschaft für sie eintrifft. Weiterhin hängt der Energieverbrauch von der Anzahl an Nachrichten-IDs ab, an der eine einzelne Station interessiert ist. Da dies von Station zu Station stark variieren kann, werden im Folgenden zwei Typen von Stationen definiert. Außerdem hängt der Energieverbrauch von der Anzahl der übertragenen Botschaften auf dem Kanal ab.

Der Energieverbrauch wird als Verhältnis der Einschaltdauer des Transceivers zur Dauer zwischen den Beacons angegeben. Ein Wert von 100% entspricht einem Transceiver, der zwischen den Beacons ununterbrochen aktiv ist. Dieser Wert wird nicht erreicht, da angenommen wird, dass die Transceiver während der Interframe Spaces und im Idle-Abschnitt am Ende der Beacon Periode abgeschaltet sind. Für die Einschaltdauer wird also nur die Prioritätsauflösung sowie der Empfang von Botschaften berücksichtigt.

Best Case: Für diesen Fall gilt folgende Annahme: Eine Station ist lediglich an einer einzigen Nachrichten-ID interessiert und die IDs sind gleichverteilt. Weiterhin ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Botschaft einer bestimmten ID für alle IDs identisch. Mit dieser Annahme kann die Anzahl an Prioritätsauflösungsslots abgeschätzt werden, in denen eine Station im Mittel aktiv sein muss, bis sie entscheiden kann, ob die Botschaft für sie von Interesse ist:

$$\overline{N_{PRS_aktiv}} = \frac{N_{PRS}}{2^{N_{PRS}}} + \sum_{n=1}^{N_{PRS}} \frac{n}{2^n} \quad (6.1)$$

Da Gleichung 6.1 mit zunehmender Anzahl an Prioritätsauflösungsslots (N_{PRS}) rasch gegen zwei konvergiert (für 12 PRS gilt $\overline{N_{PRS_aktiv}} = 1,9995$), wird angenommen, dass eine Station im Best Case im Mittel in zwei Prioritätsauflösungsslots aktiv ist. In Abbildung 6.8 ist der Best-Case-Energieverbrauch für vier Verkehrswerte dargestellt. Neben den prioritätsbasierten Medienzugriffsverfahren ist zusätzlich der Energieverbrauch bei Verwendung des CSMA/CA Protokolls angegeben. Bei CSMA/CA muss der Transceiver zunächst dauerhaft aktiv sein, da jederzeit ein Frame eintreffen kann. Im Best Case kann der Energieverbrauch jedoch reduziert werden, da eine Station nach dem Empfang eines Frames, der nicht für sie von Relevanz ist, für die Dauer des RIFS, des Acknowledgments und des CIFS in den Energiesparmodus übergehen kann. Erneute Übertragungen nach Kollisionen bei CSMA/CA wurden für die Berechnung des Energieverbrauchs nicht berücksichtigt, da die Kollisionsrate von der Anzahl der aktiven Stationen und der Verkehrscharakteristik abhängt.

Im Vergleich zu PR+ und Rot MAC hat PR MAC außer bei hoher Verkehrsauslastung den höchsten Energieverbrauch. Mit PR+ MAC kann der Energieverbrauch besonders bei niedrigem Verkehrsaufkommen reduziert werden. Bei hoher Last ist der Energieverbrauch dagegen durch den zusätzlichen Overhead erhöht. Mit Rot MAC kann der Energieverbrauch ebenfalls reduziert werden, da eine Best-Case-Station nur in einem

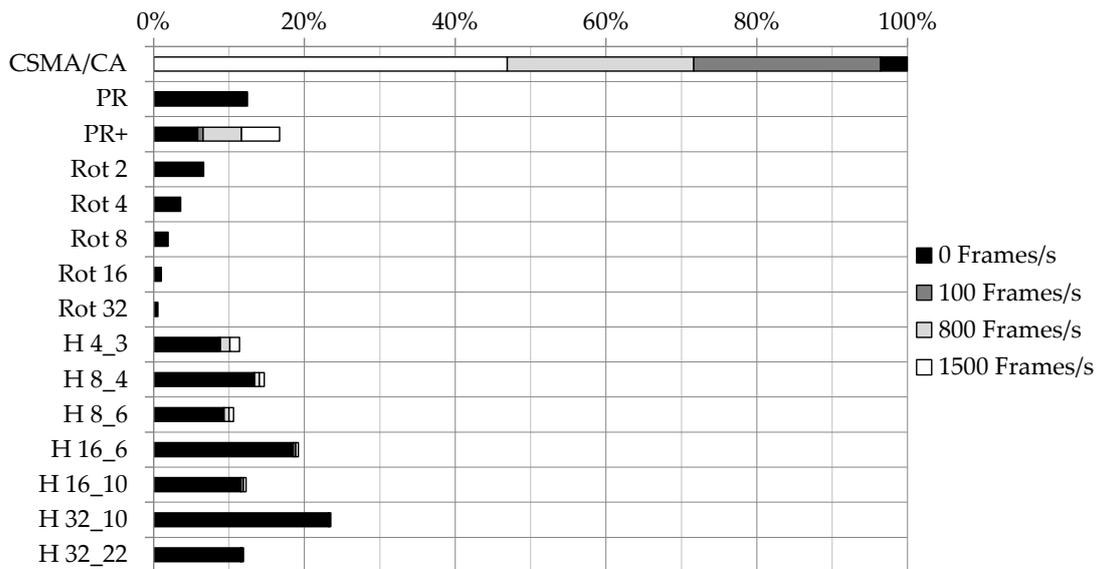


Abbildung 6.8: Best-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot, H-MAC

der Subsysteme aktiv ist. Mit den meisten Konfigurationen des hierarchischen Medienzugriffs kann der Energieverbrauch nicht reduziert werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Best-Case-Stationen besonders bei niedriger Last in der kompletten ersten Stufe der Prioritätsauflösung (PR1) aktiv sein müssen.

Der betrachtete Best Case ist ein idealisierter Fall mit seinen gleichverteilten Nachrichten-IDs und Übertragungswahrscheinlichkeiten. In einem realen System werden diese Annahmen nicht immer zutreffen. Dadurch sind Stationen unter Umständen im Mittel in mehr als zwei Prioritätsauflösungsslots aktiv. Im Folgenden wird die Definition einer Worst-Case-Station gegeben. Die meisten realen Stationen werden einen Energieverbrauch aufweisen, der zwischen dem Best und dem Worst Case liegt.

Worst Case: Die Annahme in diesem Fall ist, dass eine Station an allen Botschaften interessiert ist. Daher muss die Station in allen Prioritätsauflösungsslots sowie bei allen Frameübertragungen aktiv sein. In Abbildung 6.9 ist der Energieverbrauch im Worst Case für vier Verkehrswerte gegeben.

Der Energieverbrauch einer Worst-Case-Station ist für PR MAC (außer im Vergleich zu CSMA/CA) am höchsten. Mit PR+ MAC kann der Energieverbrauch erneut gesenkt werden, da Stationen ihren Transceiver abschalten können, wenn in einem Zugriffsslot keine Botschaft übertragen wird. Rot MAC ist durch den reduzierten Overhead geringfügig besser als PR MAC. Im Gegensatz zu den Best-Case-Stationen kann durch den hierarchischen Medienzugriff im Worst Case der Energieverbrauch reduziert werden. Für viele Konfigurationen ist die Reduzierung je nach Verkehrsaufkommen vergleichbar zu PR+ MAC. Allerdings erfolgt beim hierarchischen Medienzugriff eine Unterteilung in Subsysteme und nicht alle Präfixe erhalten einen garantierten Übertragungsslot.

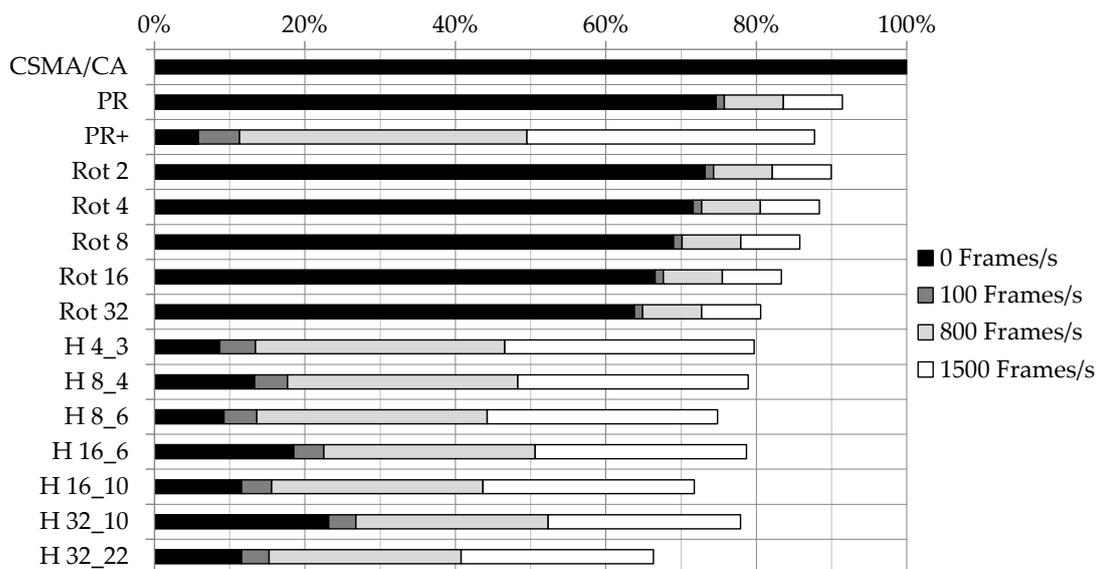


Abbildung 6.9: Worst-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot, H-MAC

6.3.4 Flexibilität

Die Flexibilität ist in der Automobilindustrie eine wichtige Eigenschaft. Systeme, die neu in das Fahrzeug Einzug halten, sind oftmals für eine lange Zeit präsent. Nachrichten-IDs, die heute vergeben werden, können meist nicht einfach geändert werden, da der Aufwand zu hoch ist, Steuergeräte für jede Fahrzeugkonfiguration zu programmieren. Außerdem ist die Diagnose erschwert, falls Botschaften in verschiedenen Fahrzeugen unterschiedliche IDs besitzen.

PR MAC sowie PR+ MAC weisen eine hohe Flexibilität auf, da die Zugriffsslots für jede verfügbare Nachrichten-ID verwendet werden können. Werden Subsysteme gebildet, ist dies bei der Vergabe der IDs zu berücksichtigen, um die Last möglichst identisch auf die einzelnen Subsysteme zu verteilen. Mit zunehmender Anzahl an Subsystemen sinkt jedoch die Flexibilität des Gesamtsystems. Daher sollte die Anzahl an Subsystemen so gering wie möglich gewählt werden.

6.3.5 Fazit

Betrachtet man den Durchsatz, die Verzögerung und den Energieverbrauch der Verfahren im Best als auch Worst Case, zeigt sich, dass das hierarchische Verfahren wenige Vorteile bietet. Die Nachteile des Verfahrens überwiegen, wodurch sich der hierarchische Medienzugriff nicht für den Einsatz im Fahrzeug eignet. PR+ MAC zeigt seine Stärken durch die Reduzierung des Energieverbrauchs bei niedrigem Verkehrsaufkommen. Besonders im Worst Case kann der Energieverbrauch deutlich gesenkt

werden. Jedoch wird der Protokoll-Overhead vergrößert, was sich bei hoher Kanalauslastung bemerkbar macht. Das Verfahren mit rotierendem Präfix kann den Energieverbrauch im Best Case deutlich reduzieren. Der geringere Overhead und Energieverbrauch durch die Unterteilung in Subsysteme wird allerdings mit einer verminderten Flexibilität erkauft.

6.4 Kombiniertes Zugriffsverfahren: Rot+ MAC

Um die jeweiligen Vorteile von PR+ und Rot MAC zu nutzen, wird in diesem Abschnitt eine Kombination der beiden Verfahren betrachtet. Ziel ist ein geringer Energieverbrauch sowohl für Best- als auch Worst-Case-Stationen. In Abbildung 6.10 ist der Medienzugriff mit zusätzlichem Ankündigungsslot und Unterteilung in Subsysteme dargestellt. Bereits mit zwei Subsystemen kann der Protokoll-Overhead kompensiert werden, der durch den Ankündigungsslot entsteht. Ab vier Subsystemen ist der Overhead geringer als mit PR MAC. Die Kombination wird als Rot+ MAC bezeichnet und wird hinsichtlich Durchsatz, Verzögerung, Energieverbrauch und Flexibilität bewertet.

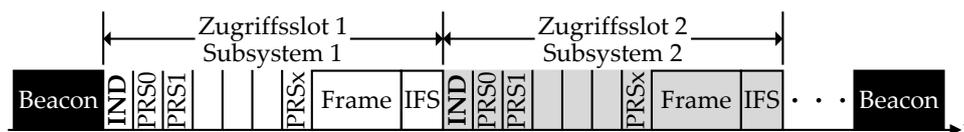


Abbildung 6.10: Kombiniertes Zugriffsverfahren: Rot+ MAC

Maximaler Durchsatz

In Abbildung 6.11 ist der maximale Durchsatz des Rot+ MACs mit rotierendem Präfix und zusätzlichem Ankündigungsslot unter Einhaltung der Deadlines dargestellt. Zum Vergleich ist auch das ursprüngliche PR MAC sowie PR+ MAC aufgeführt. Rot 2+ hat einen vergleichbaren Overhead zu PR MAC, da der zusätzliche Ankündigungsslot durch die Unterteilung in zwei Subsysteme kompensiert wird. Der Durchsatz ist dennoch geringer, da die mittlere Verzögerung durch die Unterteilung in zwei Subsysteme erhöht ist. Durch die Unterteilung in vier Subsysteme kann der Durchsatz auf einen zu PR MAC vergleichbaren Wert angehoben werden. Bei Unterteilung in weitere Subsysteme kann erneut der Effekt beobachtet werden, dass durch die strikteren Anforderungen der Szenarien 2 und 3 der maximale Durchsatz unter Einhaltung der Deadlines verringert wird.

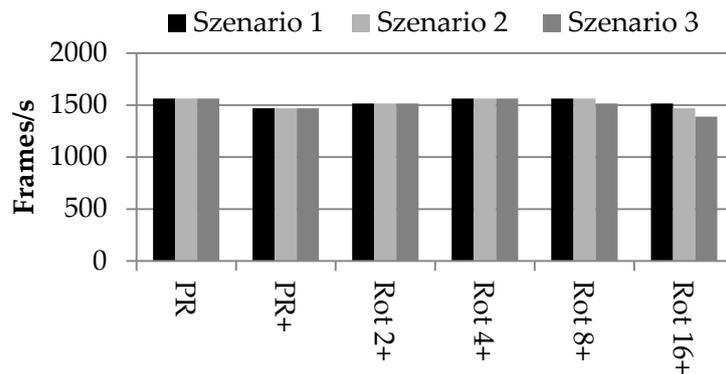


Abbildung 6.11: Maximaler 99% Quantil Durchsatz für PR, PR+ und Rot+ MAC

Verzögerung

Die maximalen Verzögerungen des 99% Quantils der drei Verkehrsklassen für Szenario 3 sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Die Kurven sind ähnlich zu den Kurven des

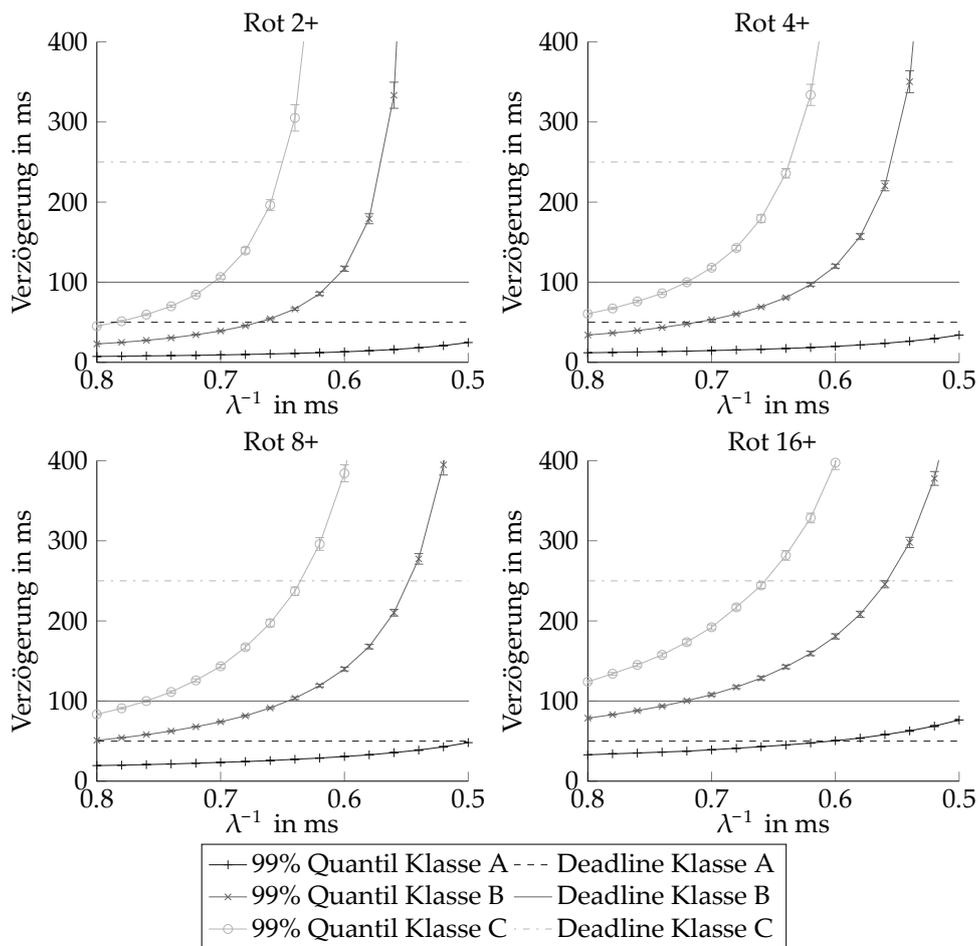


Abbildung 6.12: 99% Quantil Verzögerung bei Rot+ MAC

Rot MACs ohne Ankündigungsslot. Wegen des erhöhten Overheads sind die Kurven allerdings hin zu geringeren Verkehrswerten verschoben. Ab acht Subsystemen ist erneut das unerwünschte Verhalten zu beobachten, dass die Deadline des Klasse B Verkehrs vor Klasse C verletzt wird.

Energieverbrauch

In diesem Abschnitt wird der Energieverbrauch des Rot+ MAC mit dem des PR MAC sowie PR+ MAC verglichen. Für den Vergleich werden erneut die in Abschnitt 6.3.3 definierten Best- und Worst-Case-Stationen betrachtet. In Abbildung 6.13 ist der Energieverbrauch für den Best Case in Abhängigkeit der vier Verkehrswerte dargestellt. Durch den zusätzlichen Ankündigungsslot kann der Energieverbrauch besonders bei niedriger Auslastung weiter verringert werden.

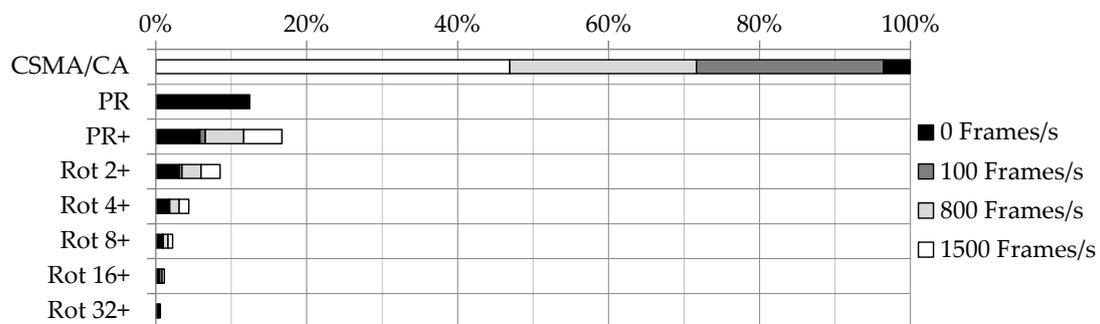


Abbildung 6.13: Best-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot+ MAC

In Abbildung 6.14 ist der Energieverbrauch im Worst Case dargestellt. Im Vergleich zu Rot MAC ohne Ankündigungsslot kann der Energieverbrauch durch Rot+ MAC auch im Worst Case deutlich verringert werden.

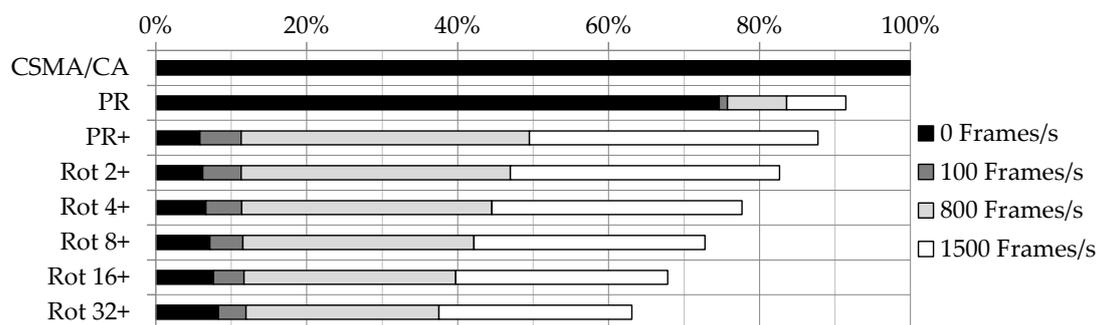


Abbildung 6.14: Worst-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot+ MAC

Flexibilität

In Abbildung 6.11 ist zu erkennen, dass bereits ab acht Subsystemen die Abnahme des Bündelungsgewinns deutlich bemerkbar ist. Basierend auf den betrachteten Aspekten ist eine Unterteilung in zwei oder vier Subsysteme sinnvoll. Mit zwei Subsystemen ist der Verlust an Flexibilität vergleichsweise gering. Stehen ein geringer Energieverbrauch und maximaler Durchsatz im Vordergrund, kann dies durch eine reduzierte Flexibilität mit vier Subsystemen erreicht werden.

6.5 Erweiterter Energiesparmodus

Neben den bereits vorgestellten Varianten kann ein weiterer Energiesparmodus eingesetzt werden. Durch die dynamische Definition von Zeitabschnitten, in denen keine Kommunikation stattfindet, kann die Dauer verlängert werden, in der sich die Transceiver aller Knoten im Energiesparmodus befinden. In Wireless Sensor Networks (WSNs) wird diese Art des Energiesparens oft eingesetzt. Die Verkürzung der Duty Cycles [BYAH06] trägt dort wesentlich zur Verlängerung der Batterielaufzeit bei.

In Abhängigkeit der Auslastung kann der Central Coordinator über den Beacon bekanntgeben, dass einzelne Slots nicht verwendet werden. Während dieser Slots können sich alle Transceiver im Energiesparmodus befinden. Der CCo muss den Kanal jedoch dauerhaft überwachen, um einen Anstieg der genutzten Slots frühzeitig zu erkennen. Im Anschluss kann er über den Beacon die Anzahl an für Übertragungen nutzbaren Slots erhöhen. Steigt der Kommunikationsbedarf der Stationen sprunghaft an, führt der Energiesparmodus zu einer temporär erhöhten Verzögerung, da der CCo die Anzahl an nutzbaren Slots erst im nächsten Beacon erhöhen kann. Daher ist ein Kompromiss zwischen einem niedrigen Energieverbrauch und einer erhöhten Verzögerung bei sprunghaftem Anstieg des Verkehrsaufkommens nötig.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Modifikationen des ursprünglichen prioritätsbasierten Medienzugriffs (PR MAC) vorgeschlagen. Ziel der Verfahren ist die Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Verlängerung der Zeiten, in denen sich die Transceiver im Energiesparmodus befinden. Mit einem zusätzlichen Ankündigungsslot für bevorstehende Übertragungen in PR+ MAC kann die Einschaltdauer der Transceiver besonders bei niedriger Auslastung deutlich reduziert werden. Der einzige Nachteil von PR+ MAC liegt in dem erhöhten Overhead durch den zusätzlichen Ankündigungsslot. Dadurch wird der maximale Durchsatz geringfügig verringert und die Verzögerung erhöht. Die Flexibilität wird nicht beeinflusst, da die Zugriffsslots für jede Nachrichten-ID verwendet werden können.

Mit Hilfe des Medienzugriffsverfahrens mit rotierendem Präfix (Rot MAC) kann der Energieverbrauch im Best Case deutlich reduziert werden. Da der Overhead im Vergleich zu PR MAC verringert wird, kann der Energieverbrauch auch im Worst Case reduziert werden. Allerdings fällt die Einsparung gering aus, da eine Worst-Case-Station in jedem Zugriffsslot aktiv ist. Mit dem hierarchischen Medienzugriff kann der Energieverbrauch für Worst-Case-Stationen reduziert werden. Im Best Case erhöhen die meisten Konfigurationen den Energieverbrauch jedoch im Vergleich zu PR MAC. Zusätzlich ist die Komplexität des hierarchischen Medienzugriffs vergleichsweise hoch. Falls die Anzahl an Zugriffsslots in einer Sektion geringer als die Anzahl der Präfixe ist, steht den niederpriorigen Präfixen keine garantierte Übertragungsmöglichkeit zur Verfügung. Aus diesem Grund ist das Zugriffsverfahren für den Einsatz im Fahrzeug nicht geeignet.

Da Rot MAC den Energieverbrauch besonders im Best Case und PR+ im Worst Case reduziert, vereint die Kombination beider Zugriffsmechanismen in Rot+ MAC die Vorteile beider Verfahren. Als Ergebnis der Untersuchung zeigen sich Rot 2+ und Rot 4+ als geeignete Varianten für den Einsatz im Fahrzeug. Der zusätzliche Protokoll-Overhead durch den Ankündigungsslot wird bereits durch die Unterteilung in zwei Subsysteme kompensiert. Im Vergleich des Rot 2+ MAC bei einer Kanalauslastung von 100 Frames pro Sekunde mit PR MAC, liegt die Reduzierung der Einschalt-dauer zwischen 72% im Best Case und 85% im Worst Case. Steigt die Kanalauslastung, reduziert sich die Einsparung. Bei 800 übertragenen Frames pro Sekunde liegt die Einsparung noch bei 51% im Best Case bzw. 43% im Worst Case.

In Abschnitt 6.1 ist angegeben, dass das Verhältnis des Energieverbrauchs eines PLC-Transceivers im Vergleich zu einem LIN-Transceiver beim reinen Empfang bei ca. 1:66 bis 1:79 liegt. Mit dem vorgeschlagenen Rot 2+ liegt das Verhältnis bei einer Kanalauslastung von 100 Frames pro Sekunde noch bei ca. 1:17 (Best Case) bis 1:22 (Worst Case). Bei einer Kanalauslastung von 800 Frames pro Sekunde beträgt das Verhältnis ca. 1:19 (Best Case) bis 1:49 (Worst Case).

Es ist zu erwähnen, dass eine Reduzierung der Einschalt-dauer um 50% nicht gleichbedeutend mit einer Halbierung des Energieverbrauchs ist, da ein Transceiver auch im Energiesparmodus noch Energie benötigt. Weiterhin wurden die Zeitabschnitte vernachlässigt, in denen der Transceiver zwischen den Operationsmodi wechselt, da hierfür keine Daten zur Verfügung standen. Je nach Verfahren werden die Transceiver unterschiedlich oft zwischen den Modi umgeschaltet. Ein häufiges Ein- und Ausschalten der Transceiver kann den Energieverbrauch unter Umständen deutlich erhöhen.

Der erweiterte Energiesparmodus durch eine Verkürzung der Duty Cycles kann prinzipiell mit allen vorgestellten Medienzugriffsverfahren kombiniert werden. Die erhöhte Verzögerung besonders bei sprunghaftem Anstieg des Verkehrsaufkommens ist jedoch bei der Planung zu berücksichtigen.

7 Echtzeitverhalten

In diesem Kapitel wird das Echtzeitverhalten des prioritätsbasierten Medienzugriffs untersucht. Als Echtzeitkommunikation wird die Kommunikation im Folgenden bezeichnet, sofern die Botschaften innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne (Deadline) übertragen werden.

Zunächst wird bestimmt, ob alle Botschaften eines PLC-Systems einplanbar sind. Einplanbar bedeutet, dass alle betrachteten Botschaften innerhalb ihrer Deadlines übertragen werden können. In einem ersten Schritt werden die Worst-Case-Antwortzeiten der einzelnen Botschaften in Abhängigkeit höherpriorer Botschaften bestimmt. Im Anschluss wird ein modifizierter Algorithmus vorgestellt, der die Reihenfolge der Prioritäten der Botschaften bestimmt, welche die Robustheit maximiert. Der Begriff der Robustheit wird dazu in diesem Kapitel neu definiert. Nach der Identifizierung der Reihenfolge der Botschaften ist diese auf den Prioritäts- bzw. Adressraum abzubilden. Für die Zuteilung kann eine Reservierung bestimmter Bereiche des Adressraums erfolgen, um die Flexibilität im Hinblick auf eine variierende Verkehrszusammensetzung zu erhöhen.

Es wird von einem PLC-System ausgegangen, das den prioritätsbasierten Medienzugriff aus Abschnitt 5.3.3 verwendet. Die Gleichungen werden allgemeingültig für N_s Subsysteme gegeben. Ein System mit zusätzlichem Ankündigungsslot (PR+ MAC oder Rot+ MAC) kann untersucht werden, wenn die Anzahl an Prioritätsauflösungsslots um einen Slot inkrementiert wird.

Die Untersuchung von Worst-Case-Antwortzeiten ist besonders im Bereich der Realzeit-Computersysteme wichtig. Der prioritätsbasierte Medienzugriff (PR MAC) sowie die Arbitrierung auf dem CAN-Bus können als Einprozessorsystem mit festen Prioritäten und unterbrechungsfreier Ausführung der Tasks betrachtet werden. Die Untersuchung solcher Systeme wurde bereits in verschiedenen Veröffentlichungen für die Bestimmung von Worst-Case-Antwortzeiten auf dem CAN-Bus eingesetzt. Eine wichtige Grundlage der Analyse von CAN-Botschaften bilden die Forschungsarbeiten von Tindell und Burns [TB94] sowie Tindell u. a. [THW94], [TBW95]. Diese zeigen, wie Untersuchungen des nicht-präemptiven Scheduling von Einprozessorsystemen mit fester Priorität zur Bestimmung der Echtzeitfähigkeit von CAN-Bussen angepasst werden können.

Basierend auf bisherigen Untersuchungen veröffentlichten George u. a. [GRS96] eine umfassende Analyse von Realzeit-Einprozessorsystemen für sowohl unterbrechende als auch nicht-unterbrechende Taskausführungen. Im Jahr 2006 zeigte Brill [Bri06],

dass bestehende Untersuchungen in bestimmten Fällen Worst-Case-Antwortzeiten ermitteln, die zu optimistisch sind. Auch die Arbeiten von Tindell u. a. sind davon betroffen. Davis u. a. veröffentlichten daraufhin 2007 [DBBL07] eine überarbeitete Analyse des Scheduling für CAN, in der die Ungenauigkeit der optimistischen Berechnungen behoben wird. Mit Hilfe dieser Veröffentlichung können die Worst-Case-Antwortzeiten von CAN-Botschaften bestimmt werden. Basierend auf den Antwortzeiten kann für eine gegebene Menge an Botschaften bestimmt werden, ob diese auch im Worst Case stets ihre Deadline einhalten. Da der prioritätsbasierte Medienzugriff und die Arbitrierung des CAN-Busses ähnlich arbeiten, bildet diese Veröffentlichung die Grundlage für die in diesem Kapitel präsentierte Echtzeitanalyse des PR MAC Protokolls.

7.1 Systemmodell

In diesem Abschnitt werden das zugrundeliegende Systemmodell sowie die verwendeten Variablen und Gleichungen vorgestellt, mit deren Hilfe sich die Worst-Case-Antwortzeiten der PLC-Botschaften bestimmen lassen. Damit kann festgestellt werden, ob ein gegebenes System die Echtzeitanforderungen einhält. Die Echtzeitbedingung einer Botschaft gilt als erfüllt, sofern diese selbst im Worst Case innerhalb ihrer Deadline übertragen wird. Da die Untersuchung auf [DBBL07] aufbaut, werden soweit möglich identische Variablennamen verwendet.

Alle PLC-Geräte synchronisieren sich auf den Beacon, der vom Central Coordinator zyklisch ausgesendet wird. Zu Beginn eines Zugriffsslots starten die Knoten die Prioritätsauflösung für den jeweils höchstpriorären Frame. Dieser Punkt ist essenziell, damit das betrachtete System als Einprozessorsystem mit zentralen Warteschlangen betrachtet werden kann. Für die Untersuchung der Echtzeitfähigkeit werden ausschließlich Botschaften mit Echtzeitanforderungen berücksichtigt. Hintergrundverkehr ohne Deadline wird dagegen nicht betrachtet.

Wie auch in [DBBL07] wird m als Synonym entweder für eine Botschaft m oder für die Prioritätsstufe m verwendet. Die zu sendenden Botschaften werden durch Software-Tasks erzeugt. Diese Tasks werden beispielsweise periodisch oder durch Interrupts ausgelöst. Da auf einem Steuergerät in der Regel mehrere Tasks ausgeführt werden, wird ein Jitter berücksichtigt, durch welchen die Erstellung der zu sendenden Botschaft auch bei periodischen Tasks variiert. Für jede Task existiert eine Obergrenze der Dauer zwischen dem Ereignis, das die Task auslöst und dem Einreihen der zu versendenden Botschaft in die Warteschlange. Das sogenannte Queuing Jitter einer Botschaft m wird mit J_m bezeichnet.

Das Ereignis, das die Erzeugung und letztendlich das Einreihen der Botschaft auslöst, tritt mit einem minimalen Intervall T_m auf und wird auch als Periode der Botschaft bezeichnet. Für streng periodische Botschaften entspricht T_m exakt dieser Periode.

Bei sporadisch auftretenden Botschaften bezeichnet T_m den minimalen zeitlichen Abstand zweier Botschaften. Für Botschaften, die z.B. nur ein einziges Mal beim Aufstarten des Fahrzeugs ausgesendet werden, gilt $T_m = \infty$. In Abbildung 7.1 sind die Taskperiode T_m sowie das Queuing Jitter J_m dargestellt. Die Nachricht N_a wird in dem Beispiel am Ende des Queuing-Fensters eingeplant, wogegen die Nachricht N_b direkt am Anfang des darauffolgenden Queuing-Fensters eingeplant wird. Dadurch ist der zeitliche Abstand zwischen den beiden Nachrichten in diesem Fall deutlich geringer als die Taskperiode T_m .

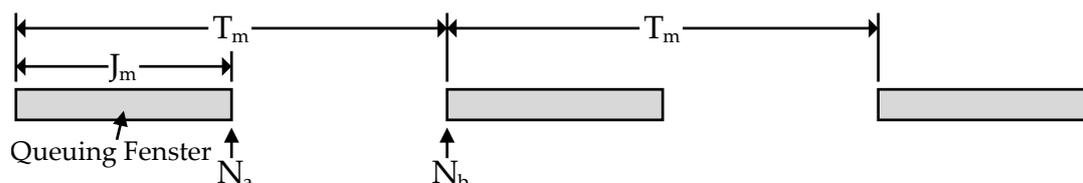


Abbildung 7.1: Taskperiode und Queuing Jitter

Jede echtzeitkritische Botschaft besitzt eine Deadline, die mit D_m bezeichnet wird. Die Deadline D_m der Botschaft m entspricht der maximalen Dauer, die zwischen dem Auftreten des erzeugenden Ereignisses bis zum erfolgreich abgeschlossenen Aussenden der Botschaft vergehen darf, ohne die Echtzeitanforderung zu verletzen.

Die Worst-Case-Antwortzeit einer Botschaft wird als R_m bezeichnet und entspricht der Dauer zwischen dem erzeugenden Ereignis und dem erfolgreich abgeschlossenen Aussenden der Botschaft, die im Worst Case auftritt.

Eine Botschaft m hält ihre Echtzeitanforderungen ein, wenn die Worst-Case-Antwortzeit kleiner oder gleich der Deadline ist: $R_m \leq D_m$. Diese Bedingung muss für alle betrachteten Botschaften eines Systems eingehalten werden, damit das Gesamtsystem die Echtzeitanforderungen erfüllt.

Die Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeiten wird in Abhängigkeit von N_s Subsystemen gegeben. Als Voraussetzung wird angenommen, dass die Anzahl der Zugriffsslots pro Beacon Periode für alle Subsysteme identisch ist. Die Dauer der Beacon Periode kann derart gewählt werden, dass diese Annahme erfüllt ist.

7.2 Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeit

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Gleichungen erläutert, mit denen die Worst-Case-Antwortzeiten der PLC-Botschaften bestimmt werden. Wie bereits angesprochen, kann ein CAN- oder PLC-System als unterbrechungsfreier Scheduler mit fixen Prioritäten und einer einzigen Bearbeitungseinheit betrachtet werden. Die Berechnungen in diesem Abschnitt basieren weitgehend auf der überarbeiteten Analyse von Davis u. a. [DBBL07].

Wie auch in den vorangegangenen Untersuchungen, setzt sich die Worst-Case-Antwortzeit einer Botschaft aus drei Teilen zusammen:

- Queuing Jitter J_m : Längste Dauer zwischen dem Ereignis, das den Botschaftsversand auslöst und dem vollständigen Vorhandensein der Botschaft in der Sendewarteschlange
- Queuing Delay w_m : Längste Verweildauer der zu sendenden Botschaft in der Sendewarteschlange
- Übertragungszeit C_m der Botschaft m

Die Worst-Case-Antwortzeit R_m der Botschaft m bestimmt sich zu:

$$R_m = J_m + w_m + C_m \quad (7.1)$$

Das Queuing Delay w_m setzt sich wiederum aus mehreren Elementen zusammen:

- Blockierung B_m durch einen Frame niedrigerer Priorität, der gerade ausgesendet wird
- Beacons und Idle-Zeiten in der Beacon-Periode
- Verzögerungen durch Frames mit höherer Priorität, die vor Botschaft m übertragen werden

Die Übertragungszeit C_m entspricht der Dauer vom Beginn des Aussendens bis der Frame am Empfänger vollständig vorhanden ist. Daher gilt für das vorliegende PLC-System:

$$C_m = N_{PRS} \cdot T_{PRS} + T_{Frame} \quad (7.2)$$

In [Leh90] ist eine Untersuchung periodischer Tasks gegeben, deren Deadlines größer als die Taskperioden sind. Um die Worst-Case-Antwortzeit zu finden, ist ein bestimmter zeitlicher Abschnitt zu überprüfen, der in [Leh90] als Busy Period bezeichnet wird. Die modifizierte Definition einer Busy Period aus [DBBL07] für die Analyse von CAN-Bussen kann auf die Analyse von PLC-Systemen angewendet werden. Eine Busy Period der Prioritätsstufe m ist folgendermaßen definiert:

1. Sie beginnt zum Zeitpunkt t^s , zu dem eine Botschaft der Priorität m in die Sendewarteschlange eingereiht wird und zu dem keine weitere Botschaft der Priorität $\geq m$ vorhanden ist, die vor dem Zeitpunkt t^s eingereiht wurde
2. Sie ist ein ununterbrochener Zeitabschnitt, in dem keine Übertragung einer Botschaft mit Priorität $< m$ starten kann
3. Sie endet zum Zeitpunkt t^e , zu dem der Kanal ungenutzt ist, eine neue Prioritätsauflösung starten kann und keine weitere Botschaft der Priorität $\geq m$ im gesamten System vorhanden ist

Eine Busy Period zeichnet sich dadurch aus, dass alle Botschaften der Priorität $\geq m$, die innerhalb der Busy Period in die Warteschlange eingereiht werden, auch innerhalb der Busy Period übertragen werden. Dadurch wirken sich diese Nachrichten nicht auf nachfolgende Busy Periods aus.

Zur Bestimmung der maximalen Antwortzeit einer Botschaft ist die längste Busy Period zu identifizieren. Die Busy Period der Priorität m mit maximaler Länge entsteht, wenn zu Beginn der Busy Period die Übertragung einer Botschaft mit Priorität $< m$ gerade begonnen hat und gleichzeitig alle Nachrichten der Priorität $\geq m$ eintreffen. Außerdem wird jede dieser Botschaften jeweils nach ihrer minimalen Periodendauer erneut eingeplant. Zusätzlich sind die Beacons bei dem betrachteten PLC-System zu berücksichtigen, welche vom Central Coordinator ausgesendet werden. Die Worst-Case-Antwortzeit kann durch Betrachtung aller Instanzen einer Botschaft der Priorität m innerhalb der maximalen Busy Period bestimmt werden. Für die Untersuchungen in diesem Abschnitt wird stets die Busy Period mit maximaler Dauer betrachtet.

Im Folgenden wird die Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeit für ein PLC-System mit N_s Subsystemen erläutert. Wird ein PLC-System mit mehreren Subsystemen betrachtet, kann jedes Subsystem eigenständig untersucht werden. Bei der Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeiten ist die Blockierung durch die anderen Subsysteme zu berücksichtigen.

Im Vergleich zur Analyse von CAN-Bussen sind für PLC-Systeme Anpassungen an den Gleichungen nötig, da zum einen der Beacon zu berücksichtigen ist, zum anderen ist die Zeit zwischen den Beacons in Zugriffsslots eingeteilt. In Abbildung 7.2 ist ein Idle-Abschnitt zwischen dem letzten Zugriffsslot einer Beacon Periode und dem Beacon zu sehen. Dieser Abschnitt muss nicht zwingend vorhanden sein. Bei Vorhandensein wird statt der Dauer eines Beacons der Ausdruck $(T_{Idle} + T_{Beacon})$ verwendet.



Abbildung 7.2: Struktur des PR Medienzugriffs

Für die Berechnung gilt die Annahme, dass die Anzahl an Zugriffsslots je Subsystem zwischen den Beacons identisch ist. Weiterhin wird auch die Reihenfolge der Subsysteme nicht variiert.

Die maximale Blockierungszeit B_m durch eine Botschaft niedrigerer Priorität entsteht, wenn direkt nach Beginn einer Prioritätsauflösung ein Frame der Priorität m eintrifft, der nicht mehr an der Prioritätsauflösung teilnehmen kann (siehe Abschnitt 5.3.3). Somit gilt für die maximale Blockierungszeit B_m bei einem Subsystem:

$$B_m = N_{PRS} \cdot T_{PRS} + (T_{Frame} + T_{IFS}) = T_{Access_Slot} \quad (7.3)$$

Die maximale Blockierungszeit B_m bei N_s Subsystemen beinhaltet zusätzlich die Blockierung durch die anderen $(N_s - 1)$ Subsysteme, die nach dem Frame niedrigerer Priorität zum Zuge kommen:

$$B_m = T_{Access_Slot} + (N_s - 1) \cdot T_{Access_Slot} = N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.4)$$

Wie in [DBBL07] beschrieben, müssen alle Instanzen einer Botschaft innerhalb einer Busy Period untersucht werden, um die Worst-Case-Antwortzeit der Botschaft m zu identifizieren. Zunächst wird die Dauer t_m der Level- m Busy Period bestimmt:

$$t_m = B_m + \left\lceil \frac{t_m}{T_{Beacon_Period}} \right\rceil \cdot (T_{Beacon} + T_{Idle}) + \sum_{\forall k \in hep(m)} \left\lceil \frac{t_m + J_k}{T_k} \right\rceil \cdot N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.5)$$

Der zweite Summand bestimmt die Dauer, die der Kanal innerhalb der Busy Period durch Beacons inklusive Idle-Perioden belegt ist. Über den letzten Term wird die Dauer bestimmt, durch die der Kanal durch Übertragungen von Botschaften der Priorität m und höher belegt ist. Mit $hep(m)$ wird die Menge der Botschaften mit Priorität $\geq m$ bezeichnet. Im Falle von N_s Subsystemen folgen auf jede Übertragung im eigenen Subsystem $(N_s - 1)$ Übertragungen der anderen Subsysteme. Daher wird die Anzahl der durch Botschaften höherer oder gleicher Priorität belegten Zugriffsslots mit der Anzahl der Subsysteme multipliziert.

Es ist zu erwähnen, dass t_m auf beiden Seiten der Gleichung vorkommt. Da die Gleichung jedoch eine monoton wachsende Funktion von t_m ist, kann sie rekursiv gelöst werden:

$$t_m^{n+1} = B_m + \left\lceil \frac{t_m^n}{T_{Beacon_Period}} \right\rceil \cdot (T_{Beacon} + T_{Idle}) + \sum_{\forall k \in hep(m)} \left\lceil \frac{t_m^n + J_k}{T_k} \right\rceil \cdot N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.6)$$

Als Startwert der Rekursionsgleichung kann $t_m^0 = B_m + T_{Beacon} + T_{Idle} + C_m$ gewählt werden, da im Worst Case nach der Blockierung durch einen niederprioritären Frame mindestens ein Beacon inklusive Idle-Periode und im Anschluss der Frame übertragen wird. Das Abbruchkriterium für die Rekursionsgleichung lautet $t_m^{n+1} = t_m^n$. Vor Ausführung muss sichergestellt sein, dass die Auslastung U_m des PLC-Subsystems für die Menge der Botschaften $hep(m)$ kleiner Eins ist. Zur Bestimmung der Auslastung ist eine Normierung auf die für ein Subsystem in einer Beacon Periode für Übertragungen nutzbaren Zeitspanne nötig:

$$U_m = \frac{N_s \cdot T_{Beacon_Period}}{N_{FBP} \cdot T_{Access_Slot}} \cdot \sum_{\forall k \in hep(m)} \frac{T_{Access_Slot}}{T_k} \quad (7.7)$$

Wie bereits erwähnt wird angenommen, dass die maximale Anzahl an Frames pro Beacon Periode N_{FBP} ein Vielfaches der Anzahl der Subsysteme N_s ist. Die Anzahl N_{FBP} der Frames pro Beacon Periode berechnet sich zu:

$$N_{FBP} = \left\lfloor \frac{T_{Beacon_Period} - (T_{Beacon_Region} + T_{Idle})}{T_{Access_Slot}} \right\rfloor \quad (7.8)$$

Gilt $t_m \leq T_m - J_m$, endet die Busy Period vor oder zum Zeitpunkt einer weiteren Instanz der Botschaft m . In diesem Fall muss nur eine Instanz der Botschaft m untersucht werden. Das Worst-Case-Queuing-Delay dieser Instanz berechnet sich wie folgt:

$$w_m = B_m + \left\lfloor \frac{w_m}{T_{Beacon_Period}} \right\rfloor \cdot (T_{Beacon} + T_{Idle}) + \sum_{\forall k \in hp(m)} \left\lfloor \frac{w_m + J_k + \tau_{res}}{T_k} \right\rfloor \cdot N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.9)$$

Jeder ausgesendete Frame eines Subsystems wird von $(N_s - 1)$ Zugriffsslots anderer Subsysteme gefolgt. Die Blockierungszeit durch höherpriorie Frames sowie der $(N_s - 1)$ Zugriffsslots der anderen Subsysteme wird über die Summe am Ende der Gleichung bestimmt. Mit $hp(m)$ wird die Menge der Botschaften mit Priorität höher m bezeichnet. Der Wert τ_{res} entspricht der Auflösung, mit der die Zeit gemessen wird. Bei Verwendung des HomePlug Standards kann für diesen Wert beispielsweise die Dauer eines Taktzyklus des internen 75 MHz Taktes gewählt werden.

Wie zuvor tritt auch w_m auf beiden Seiten der Gleichung auf. Da die Gleichung eine monoton wachsende Funktion von w_m ist, kann sie ebenfalls rekursiv gelöst werden:

$$w_m^{n+1} = B_m + \left\lfloor \frac{w_m^n}{T_{Beacon_Period}} \right\rfloor \cdot (T_{Beacon} + T_{Idle}) + \sum_{\forall k \in hp(m)} \left\lfloor \frac{w_m^n + J_k + \tau_{res}}{T_k} \right\rfloor \cdot N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.10)$$

Als Startwert der Rekursionsgleichung kann $w_m^0 = B_m + T_{Beacon} + T_{Idle}$ gewählt werden, da im Worst Case zunächst ein Frame niedrigerer Priorität übertragen wird und darauf ein Beacon inklusive Idle-Periode folgt. Es gibt zwei Abbruchkriterien für die Rekursionsgleichung:

1. Ist $J_m + w_m^{n+1} + C_m > D_m$, kann die Echtzeitbedingung für die Botschaft m nicht eingehalten werden
2. Gilt $w_m^{n+1} = w_m^n$, wurde das Worst-Case-Queuing-Delay der Botschaft m gefunden

Ist $t_m > T_m - J_m$, sind alle Instanzen einer Botschaft m innerhalb einer Busy Period zu untersuchen. Zunächst wird die Anzahl Q_m der Instanzen einer Botschaft m innerhalb einer Busy Period ermittelt:

$$Q_m = \left\lceil \frac{t_m + J_m}{T_m} \right\rceil \quad (7.11)$$

Für die Bestimmung des Worst-Case-Queuing-Delays wird die Indexvariable q verwendet, die eine Instanz einer Botschaft m bezeichnet. Mit $q = 0$ wird die erste Instanz bezeichnet. Die längste Dauer seit dem Start der Busy Period bis zum Beginn des Aussendens der Instanz q der Botschaft m berechnet sich wie folgt:

$$w_m^{n+1}(q) = B_m + \left\lceil \frac{w_m^n(q)}{T_{Beacon_Period}} \right\rceil \cdot (T_{Beacon} + T_{Idle}) + q \cdot T_{Access_Slot} \\ + \sum_{\forall k \in hp(m)} \left\lceil \frac{w_m^n(q) + J_k + \tau_{res}}{T_k} \right\rceil \cdot N_s \cdot T_{Access_Slot} \quad (7.12)$$

Als Startwert kann $w_m^0(q) = B_m + T_{Beacon} + T_{Idle} + q \cdot T_{Access_Slot}$ gewählt werden. Für $q > 0$ kann der Startwert $w_m^0(q) = w_m(q-1) + T_{Access_Slot}$ verwendet werden. Abgebrochen wird, wenn entweder $w_m^{n+1}(q) = w_m^n(q)$ gilt, oder wenn die Echtzeitbedingung verletzt ist, da $J_m + w_m^{n+1}(q) - q \cdot T_m + C_m > D_m$.

Das Ereignis, welches die Instanz q der Botschaft m auslöst, tritt zum Zeitpunkt $(q \cdot T_m - J_m)$ relativ zum Start der Busy Period auf. Damit lässt sich die Antwortzeit der Instanz q bestimmen:

$$R_m(q) = J_m + w_m(q) - q \cdot T_m + C_m \quad (7.13)$$

Mit den Antwortzeiten der einzelnen Instanzen lässt sich schließlich die Worst-Case-Antwortzeit der Botschaft m ermitteln:

$$R_m = \max_{q=0 \dots Q_m-1} R_m(q) \quad (7.14)$$

Mit den vorgestellten Gleichungen können Worst-Case-Antwortzeiten einzelner Botschaften in Abhängigkeit höherpriorer Botschaften bestimmt werden. Entscheidend ist die Reihenfolge, in der die einzelnen Prioritäten den Botschaften zugeordnet werden. Im nächsten Abschnitt wird daher die Zuteilung der Prioritäten untersucht.

7.3 Prioritätszuteilung

Mit Hilfe der Gleichungen aus dem vorangegangenen Abschnitt können Worst-Case-Antwortzeiten von Botschaften in Abhängigkeit der Menge an Botschaften mit höherer Priorität ermittelt werden. In diesem Abschnitt wird die Zuteilung der Prioritäten

zu den Botschaften betrachtet. Für diese Zuteilung sind zwei Schritte zu unterscheiden. Zunächst ist die Reihenfolge der Prioritäten zu identifizieren, mit der das System die Echtzeitanforderungen für alle Botschaften einhält. In der Regel gibt es mehrere Reihenfolgen, mit denen dieses Ziel erreicht wird. Daher wird im folgenden Abschnitt ein modifizierter Algorithmus präsentiert, der dabei die Robustheit in Bezug auf zukünftige Änderungen in der Verkehrszusammensetzung maximiert. Ist eine geeignete Reihenfolge gefunden, werden den Botschaften die IDs aus dem verfügbaren Adressraum zugeordnet. Für die Zuteilung werden Methoden diskutiert, wie Nachrichten-IDs für zukünftige Veränderungen der Verkehrszusammensetzung reserviert werden können, um die Flexibilität zu erhöhen. Auf die Reservierung von ID-Bereichen für Deadline-Klassen wird im Detail eingegangen. Weiterhin wird diskutiert, mit welchen Strategien die IDs aus den einzelnen Bereichen den Botschaften zugeteilt werden können.

7.3.1 Robuste Prioritätsreihenfolge

Die Prioritätsreihenfolge hat starken Einfluss auf die maximale Verzögerung der einzelnen Nachrichten. Sie wird durch eine Prioritätszuteilungs-Methode P festgelegt. Eine Methode P ist nach [DBBL07] optimal, wenn es kein System gibt, dessen Botschaften zwar mit anderen Methoden einplanbar sind, jedoch nicht auch mit Methode P . In der vorliegenden Arbeit wird das Ziel einer optimalen Methode erweitert. Neben der zuvor erwähnten Eigenschaft besteht das zusätzliche Ziel darin, eine Reihenfolge der Prioritäten zu identifizieren, die die maximale Robustheit aufweist [GKK]. **Robustheit** bedeutet in diesem Fall, dass eine Reihenfolge für die Prioritäten gefunden wird, die bei später hinzukommenden Nachrichten nicht direkt dazu führt, dass ein System die Echtzeitanforderungen nicht mehr einhalten kann. Ein Fahrzeughersteller ist an der Prioritätsreihenfolge mit maximaler Robustheit interessiert, um in Zukunft eine hohe Anzahl an Botschaften hinzufügen zu können, ohne die Echtzeitanforderungen bereits vorhandener Botschaften zu verletzen.

Basierend auf Arbeiten zum Prozessor-Scheduling [LW82], [ABR⁺93] geben Tindell und Burns in [TB94] an, dass eine deadline-monotone Prioritätsreihenfolge optimal für CAN ist: Botschaften mit kleinem Wert für Deadline minus Jitter ($D - J$) erhalten eine hohe Priorität. George u. a. [GRS96] zeigen jedoch, dass dies nur in dem Fall von fixen Prioritäten mit unterbrechender Taskausführung und Deadlines, die nicht länger als die Taskperioden sind, gilt. Bei unterbrechungsfreier Taskausführung dagegen ist die $(D - J)$ -monotone Prioritätsreihenfolge nicht optimal, was anhand eines Gegenbeispiels in [DBBL07] gezeigt wird.

Audsleys Algorithmus zur Identifizierung der Prioritätsreihenfolge [Aud91] kann laut [DBBL07] auch auf den CAN-Bus angewendet werden. Grundlage dafür ist, dass die Worst-Case-Antwortzeit einer Botschaft m nur von der Menge an höherprioritären Botschaften und nicht von deren Reihenfolge abhängt. Außerdem gilt: Wird die Priorität einer Botschaft von x auf $x + 1$ erhöht und hält die Botschaft auf Priorität x die

Echtzeitanforderungen ein, so hält sie diese ebenfalls auf Prioritätsstufe $x + 1$ ein (sofern die Prioritäten anderer Botschaften nicht verändert werden). Das bedeutet, dass sich die Worst-Case-Antwortzeit durch die Erhöhung der Priorität nicht vergrößern kann. Aus diesen Gründen kann bei der Identifizierung der Prioritätsreihenfolge mit der niedrigsten Prioritätsstufe begonnen werden.

Ein Schwachpunkt des Algorithmus zur Bestimmung der Prioritätsreihenfolge aus [DBBL07] wird im Folgenden beschrieben. Existiert für ein betrachtetes System mindestens eine Reihenfolge, für die das System die Echtzeitanforderungen einhält, so findet Audsleys Algorithmus auch eine Reihenfolge. Existieren jedoch mehrere Möglichkeiten, findet der Algorithmus nur irgendeine der Lösungen. Der Algorithmus durchsucht die Menge an noch nicht zugeteilten Botschaften, bis eine Botschaft gefunden ist, welche die Anforderungen einhält. Da die Botschaften nicht geordnet sind, findet der Algorithmus daher in der Regel nicht die Reihenfolge mit maximaler Robustheit. Aus diesem Grund wird der Algorithmus im Folgenden angepasst, um die Reihenfolge mit maximaler Robustheit zu identifizieren.

Maximale Robustheit bedeutet, dass die Prioritätsreihenfolge beginnend mit der niedrigsten Priorität so gewählt wird, dass die Laxity jeder Botschaft maximiert wird. Die Laxity bezeichnet die Dauer, welche maximal auf die Worst-Case-Antwortzeit aufaddiert werden kann, ohne die Deadline zu verletzen. Die Laxity L_m der Botschaft m berechnet sich zu:

$$L_m = D_m - R_m \quad (7.15)$$

Bezeichnet M die Menge an Botschaften, denen noch keine Position in der Reihenfolge zugeordnet wurde, bestimmt der Algorithmus beginnend mit der niedrigsten Priorität jeweils die Botschaft mit maximaler Laxity:

$$L_m = \max_{k=1\dots M} \{D_k - R_k\} \quad (7.16)$$

Da die Worst-Case-Antwortzeit R_m mit höherer Priorität nicht zunehmen kann, kann sich auch die entsprechende Laxity nicht reduzieren. Botschaften mit niedrigerer Priorität haben daher höhere Laxities. Dies ist wichtig, da sich hinzukommende Botschaften auf die Worst-Case-Antwortzeiten der Botschaften niedrigerer Priorität auswirken. Durch den Algorithmus wird die Reihenfolge der Botschaften gefunden, welche die zuvor definierte Robustheit maximiert. Der Algorithmus ist als Pseudocode in Abbildung 7.3 dargestellt.

Das Konzept einer robusten Prioritätsreihenfolge wird ebenfalls von Davis und Burns in [DB07] adressiert. Im Gegensatz zu der hier gegebenen Definition der Robustheit, wird eine Prioritätsreihenfolge dort als robust bezeichnet, wenn ein Maximum an zusätzlicher Interferenz toleriert werden kann. In [DB09] wird ein Algorithmus zur Bestimmung einer robusten Prioritätsreihenfolge auf CAN angewendet. Der Fokus liegt dabei darauf, dass für einen gegebenen Satz von Botschaften die Anzahl tolerierbarer Fehler sowie die tolerierbare Verzögerung maximiert und die Wahrscheinlichkeit des Verletzens von Deadlines minimiert wird. Durch diese Definition der Robustheit

```

1: for each priority, lowest first do
2:   for each unassigned message  $m$  do
3:     if  $m$  is schedulable at this priority then
4:       add  $m$  to set of schedulable messages;
5:     end if
6:   end for
7:   if set of schedulable messages not empty then
8:     calculate laxities for schedulable messages;
9:     assign message with max. laxity this priority;
10:    clear set of schedulable messages;
11:   else
12:     return unschedulable;
13:   end if
14: end for
15: return schedulable;

```

Abbildung 7.3: Algorithmus zur Bestimmung der robusten Prioritätsreihenfolge

steigt ebenfalls die Wahrscheinlichkeit, dass durch hinzukommende Botschaften nicht direkt Deadlines bereits bestehender Botschaften verletzt werden. Das Resultat hängt jedoch stark davon ab, mit welchen Parametern die mögliche Interferenz für die einzelnen Botschaften definiert ist.

Betrachtung des reinen PR MAC mit 12 PR-Slots (4096 Prioritäten)

Anhand des vorgestellten Algorithmus können die Worst-Case-Antwortzeiten für einen gegebenen Satz von Botschaften bestimmt werden. In Abbildung 7.4 sind die Worst-Case-Antwortzeiten der 4096 Nachrichten-IDs dargestellt, falls keine der Botschaften mehrfach versendet wird (die Perioden der Botschaften sind unendlich). Für das Queuing Jitter wird ein Wert von 1 ms angenommen. Als Genauigkeit τ_{res} , mit der die Zeit gemessen wird, wird die Dauer eines Taktzyklus des 75 MHz Referenztakts des HomePlug Standards verwendet.

Die Worst-Case-Antwortzeit der niedrigsten Priorität (Priorität 1) liegt bei 2,383 s. Zur Verifikation dieses Ergebnisses kann eine Näherung bestimmt werden. Da mit dem untersuchten System 1720 Frames pro Sekunde übertragen werden können, kann die Dauer für die Übertragung von 4096 Frames abgeschätzt werden:

$$\frac{4096 \text{ Frames}}{1720 \frac{\text{Frames}}{\text{s}}} = 2,381 \text{ s} \quad (7.17)$$

Der Unterschied zwischen der bestimmten Worst-Case-Antwortzeit und der Näherung kann durch die Berücksichtigung des Queuing Jitters, einer Blockierung B_m sowie durch Abweichungen des Taktgebers begründet werden.

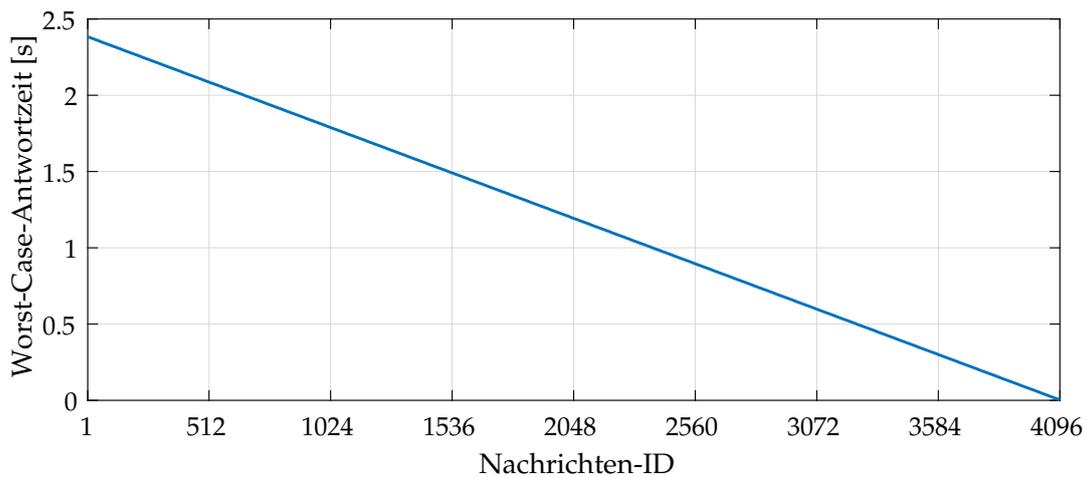


Abbildung 7.4: Worst-Case-Antwortzeiten der 4096 IDs mit unendlicher Periode

In Abbildung 7.5 sind ausschließlich die Werte der 256 höchsten Prioritäten dargestellt. In dieser Darstellung sind auch zwei Sprünge in der Worst-Case-Antwortzeit zu erkennen, die im Abstand einer Beacon Periode durch die zusätzlichen Beacon Regionen und Idle-Abschnitte entstehen.

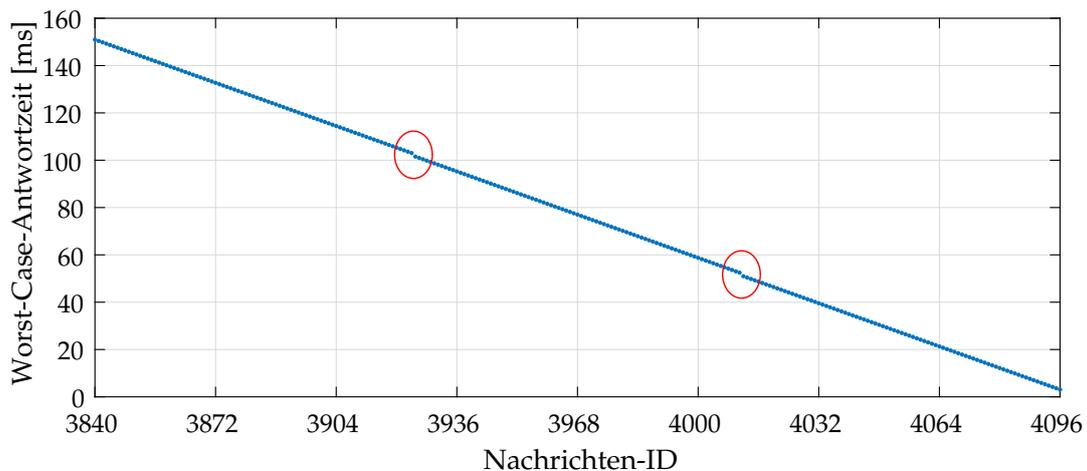


Abbildung 7.5: Worst-Case-Antwortzeiten der IDs 3840-4096 mit unendlicher Periode

Da die Worst-Case-Antwortzeiten nur von Botschaften mit höherer oder gleicher ID abhängen, kann für hochprioritäre Botschaften bereits eine Aussage getroffen werden. Beträgt die minimale Nachrichtenperiode beispielsweise 50 ms und wird das Queuing Jitter mit 1 ms angenommen, kann anhand von Abbildung 7.5 festgestellt werden, dass die IDs 4014 bis 4096 Worst-Case-Antwortzeiten unter 50 ms aufweisen. Im Falle einer minimalen Nachrichtenperiode von 10 ms werden die IDs 4084 bis 4096 mit einer garantierten Worst-Case-Antwortzeit unter 10 ms übertragen. Für niedrigere Prioritäten lässt sich basierend auf Abbildung 7.5 keine Aussage treffen, da durch die Nachrichtenperioden höherprioritärer Botschaften die Antwortzeiten niedrigerer Prioritäten vergrößert werden.

7.3.2 Reservierung und Zuteilung der IDs

Die Prioritätsreihenfolge kann für aktuell bekannte Botschaften sowie für eine Vorhersage der zukünftigen Verkehrszusammensetzung optimiert werden. Trifft diese Vorhersage jedoch nicht exakt ein, kann es vorkommen, dass durch bereits belegte IDs neue Botschaften nicht mehr eingeplant werden können, ohne eine Worst-Case-Antwortzeit kleiner oder gleich ihrer Deadline aufzuweisen. Aus diesem Grund sollte die Prioritätsvergabe vor dem Hintergrund erfolgen, dass die Flexibilität für zukünftig hinzukommende Botschaften erhöht wird.

Zunächst ist es nötig, die maximale Anzahl an IDs zu bestimmen, die im Worst Case unter Einhaltung einer vorgegebenen Deadline benötigt werden. Für die Worst-Case-Antwortzeit treffen alle Botschaften größer oder gleich der betrachteten Prioritätsstufe gleichzeitig ein. Die Anzahl der benötigten IDs wird maximal, wenn jede dieser Botschaften nur exakt einmal eintrifft. Unter Vernachlässigung der Beacons oder des Queuing Jitters kann eine Abschätzung der maximal benötigten IDs für Verkehr mit einer bestimmten Deadline D_j erfolgen:

$$N_{ID_max}(D_j) = \left\lfloor \frac{\text{max. Frames/s}}{D_j^{-1}} \right\rfloor \quad (7.18)$$

Wird ein System mit 12 PR-Slots betrachtet, das maximal 1720 Frames pro Sekunde übertragen kann, ergibt sich für eine Deadline von 50 ms eine maximale Anzahl von 86 IDs. Dies entspricht der Anzahl an Zugriffsslots, die in einer Beacon Periode von 50 ms zur Verfügung stehen. Werden mehrere Subsysteme betrachtet, ist die maximale Anzahl an Frames pro Sekunde je Subsystem zu verwenden. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Bestimmung der maximalen Anzahl nur für den Worst Case gilt, in dem alle Botschaften kleiner oder gleich der Deadline gleichzeitig eintreffen.

Unter Berücksichtigung der Beacons sowie des Queuing Jitters ist die maximale Anzahl benötigter IDs niedriger. Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die 83 IDs 4014 bis 4096 mit den gewählten Parametern eine Worst-Case-Antwortzeit kleiner oder gleich 50 ms aufweisen. In Abbildung 7.6 ist die maximale Anzahl an IDs in Abhängigkeit von Deadline-Klassen in 10 ms Schritten für das betrachtete System unter Berücksichtigung der Worst-Case-Antwortzeit dargestellt. Wird die Anzahl benötigter IDs für die in Abbildung 7.6 dargestellten Deadlines mit Hilfe von Gleichung 7.18 bestimmt, besteht eine geringe Abweichung. Je nach Deadline-Klasse ist die bestimmte Anzahl an benötigten IDs mit Gleichung 7.18 zwischen drei und vier IDs höher. Im Folgenden wird jedoch gezeigt, dass die Reservierung von zusätzlichen IDs nicht immer von Nachteil ist. Neben der Definition von Deadline-Klassen ist es auch möglich, exakte Deadlines für die einzelnen Botschaften zu berechnen. In diesem Fall besteht jede Deadline-Klasse aus exakt einer ID.

Die maximale Anzahl an IDs kann nur vergeben werden, wenn keine höherpriorären Botschaften existieren, deren Periode kürzer als die aktuell betrachtete Deadline ist. Falls Botschaften mit kürzeren Perioden existieren, sinkt die Anzahl an nutzbaren IDs,

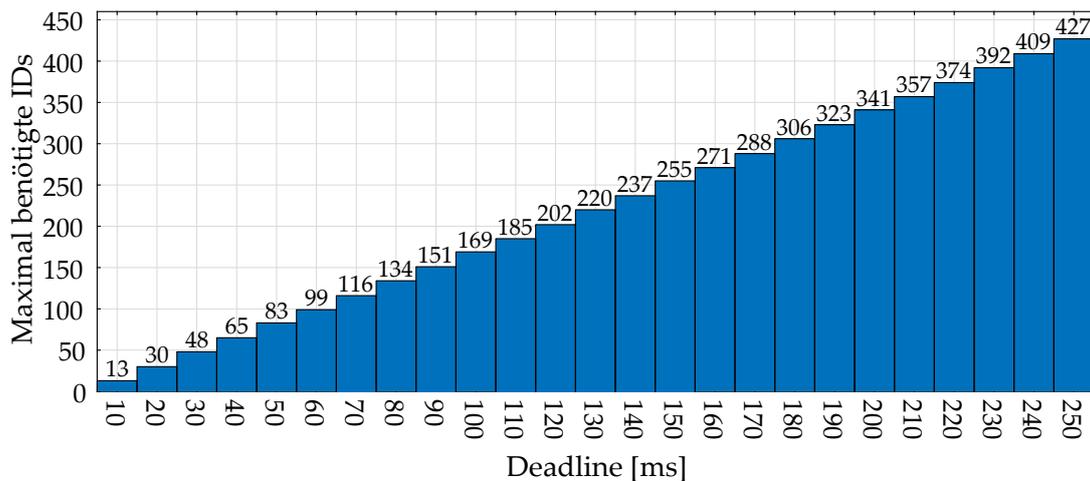


Abbildung 7.6: Maximale Anzahl benötigter IDs in Abhängigkeit der Deadline

für die im Worst Case eine Antwortzeit kleiner oder gleich der Deadline garantiert werden kann. In Tabelle 7.1 ist für ein Beispiel mit zwei Verkehrsklassen die maximal benötigte Anzahl an IDs dargestellt. Sind beispielsweise bereits fünf Botschaften mit einer Periode von 10 ms eingeplant, können nur noch maximal 58 IDs für Verkehr mit einer Deadline von 50 ms genutzt werden, ohne eine Worst-Case-Antwortzeit von 50 ms zu überschreiten.

Tabelle 7.1: Maximale Anzahl an IDs bei zwei periodischen Verkehrsklassen

Periode/Deadline	Maximal nötige Anzahl an IDs													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10 ms	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50 ms	83	78	73	68	63	58	53	48	43	38	33	28	23	18

Durch Anpassung von Gleichung 7.18 kann für höhere Deadline-Klassen D_j ($j \geq 1$) in Abhängigkeit der Klassen mit kürzerer Deadline (D_0 bis D_{j-1} , wobei D_0 die kürzeste Deadline angibt) eine Obergrenze für die Anzahl an nötigen IDs abgeschätzt werden:

$$N_{ID_max}(D_j) = \left\lfloor \frac{(\text{max. Frames/s}) - \sum_{k=0}^{(j-1)} [(\text{belegte IDs in Klasse } k) \cdot D_k^{-1}]}{D_j^{-1}} \right\rfloor \quad (7.19)$$

Mit diesen Ergebnissen lassen sich Vorschriften für die Vergabe der Prioritäten aus dem Adressraum ableiten. Betrachtet man Abbildung 7.6, so ist eine Möglichkeit, die höchsten 427 IDs des Adressraums für Verkehr mit Deadlines kleiner oder gleich 250 ms zu reservieren. Die höchsten 13 IDs werden nur für Botschaften mit Deadlines kleiner oder gleich 10 ms verwendet, die nächsten 30-13=17 IDs für Botschaften mit einer maximalen Deadline von 20 ms usw. Wie im Beispiel in Tabelle 7.1 ist in Abhängigkeit der bereits vergebenen IDs zu bestimmen, wie viele IDs für Deadline-Klassen

niedrigerer Priorität noch zur Verfügung stehen. Diese Reservierung von IDs kann dazu führen, dass nicht mehr alle IDs des Adressraums vergeben werden können. Jedoch wird dadurch sichergestellt, dass ausreichend IDs für alle möglichen Verkehrszusammensetzungen vorhanden sind.

Für die vier Deadline-Klassen von 10, 50, 100 und 250 ms wird exemplarisch bestimmt, wie viele Möglichkeiten bestehen, IDs aus den vier Klassen zu vergeben, ohne dass die jeweilige Worst-Case-Antwortzeit die Deadline überschreitet. Bei Verwendung dieser vier Klassen gibt es ohne die triviale Lösung keiner verwendeten ID insgesamt 4.673.717 Möglichkeiten Botschaften einzuplanen. Interessant sind die Kombinationen, bei denen die Auslastung maximiert wird. Sind in einem System beispielsweise 10 Botschaften einer Klasse einplanbar, sind ebenfalls 9 Botschaften dieser Klasse einplanbar, sofern die anderen Botschaften unverändert sind. Werden die Kombinationen entfernt, bei denen die Kanalauslastung nicht maximal ist, bestehen noch 44.982 mögliche Aufteilungen auf die Klassen. Mit Hilfe dieser Lookup-Tabelle kann für ein bestehendes System bestimmt werden, wie viele Botschaften in welchen Klassen im Worst Case hinzugefügt werden können, ohne die Deadlines zu überschreiten. Die Berechnung der Kombinationen kann auch für weitere Deadline-Klassen erfolgen. Allerdings steigt der Berechnungsaufwand rasch mit zunehmender Anzahl an Klassen sowie der maximalen Anzahl an Botschaften je Klasse.

Die Annahme, dass im Worst Case alle Botschaften gleichzeitig eintreffen, ist unter Umständen zu restriktiv. Durch dieses Vorgehen kann es vorkommen, dass ein System fälschlicherweise als nicht einplanbar erachtet wird. Es können jedoch nicht alle Botschaften jederzeit übertragen werden. Es existieren Fahrzeugzustände, in denen bestimmte Botschaften nie auftreten. Ein Beispiel ist ein Park-Assistent, der bei abgeschaltetem Motor oder bei Fahrten über einer bestimmten Geschwindigkeit nicht aktiv ist. Werden Fahrzeugzustände unterschieden, können weitere IDs aus dem Adressraum vergeben werden, die zuvor von der Vergabe ausgeschlossen wurden. Jedoch ist sicherzustellen, dass in jedem der Betriebszustände die maximal erlaubte Anzahl vergebener IDs in Abhängigkeit der Deadline-Klassen nicht überschritten wird.

Ist die Anzahl der unterscheidbaren Fahrzeugzustände hoch, kann es sinnvoll sein, mehr als die in Abbildung 7.6 gezeigten IDs für die jeweiligen Deadline-Klassen zu reservieren. Wird beispielsweise die doppelte Anzahl an IDs je Klasse reserviert, ist für mindestens zwei Fahrzeugzustände sichergestellt, dass ausreichend IDs zur Verfügung stehen. Da einige Botschaften nicht nur in einem Fahrzeugzustand übertragen werden, weisen die Zustände eine gewisse Überlappung der übertragenen IDs auf. Um eine Worst-Case-Reservierung vorzunehmen, ist dieser Überlappungsfaktor zu berücksichtigen. Dadurch wird sichergestellt, dass für alle Zustände ausreichend IDs vorhanden sind. Jedoch ist nicht die gesamte Überlappung von Relevanz, sondern die Überlappung in den einzelnen Deadline-Klassen. Ein Beispiel mit zwei Deadline-Klassen von 10 ms und 50 ms wird im Folgenden gegeben. Wie in Abbildung 7.6 zu sehen, werden für eine Deadline von 10 ms maximal 13 IDs und für 50 ms maximal 83 IDs benötigt. Beträgt die Überlappung 30% bei der 10 ms Deadline und 40% bei einer

Deadline von 50 ms, sind für maximale Flexibilität $\lceil 170\% \cdot 13 \rceil = 23$ IDs für 10 ms und $\lceil 160\% \cdot 83 \rceil = 133$ IDs für 50 ms Deadlines zu reservieren.

Interessant ist die Gesamtanzahl an IDs, die für eine bestimmte Verkehrszusammensetzung benötigt werden. Ist viel Verkehr mit großen Deadlines bzw. Perioden vorhanden, ist die Anzahl belegter IDs höher, als bei Verkehr mit kleinen Perioden. Wird das Beispiel mit vier Deadline-Klassen mit Deadlines von 10, 50, 100 und 250 ms betrachtet und werden die 44.982 Verkehrszusammensetzungen mit maximaler Auslastung berücksichtigt, sind minimal 38 und maximal 427 IDs belegt. Über alle 44.982 Kombinationen hinweg werden im Mittel knapp über 172 IDs verwendet. Dies bedeutet, dass im Mittel lediglich 40% der reservierten IDs belegt sind. Wenn die zuvor beschriebenen Fahrzeugzustände betrachtet werden, können bisher von der Vergabe ausgeschlossene IDs für andere Fahrzeugzustände verwendet werden. Allerdings ist dadurch nicht mehr sichergestellt, dass für jede mögliche Verkehrszusammensetzung in Zukunft ausreichend IDs vorhanden sind.

Ist die Reservierung abgeschlossen, ist festzulegen, wie die IDs aus den reservierten Bereichen den Botschaften zugeteilt werden. Eine optimale Strategie existiert nicht, da die Vergabereihenfolge von den Anforderungen der Botschaften abhängt. Existiert beispielsweise eine Botschaft, die in einem Notfall wie bei einem Unfall unbedingt vor allen anderen Botschaften zu übertragen ist, muss dieser Botschaft die höchste zur Verfügung stehende Priorität zugeordnet werden. Allerdings kann dadurch keiner Botschaft in Zukunft eine höhere Priorität zugeteilt werden ohne die bestehende Konfiguration anzupassen. Existieren keine besonderen Anforderungen innerhalb einer Deadline-Klasse, können Prioritäten beginnend in der Mitte des jeweiligen ID-Bereichs vergeben werden. In Abbildung 7.7 ist ein Beispiel dargestellt, in dem mit X markierte IDs bereits vergeben sind. Die höchste ID (4096) ist durch eine Botschaft mit maximalen Anforderungen belegt. Die restlichen IDs werden von der Mitte der ID-Bereiche beginnend zugewiesen. Solange diese Bereiche nicht vollständig zu beiden Grenzen gefüllt sind, stehen dadurch für zukommende Botschaften stets IDs mit höherer bzw. niedrigerer Priorität zur Verfügung.

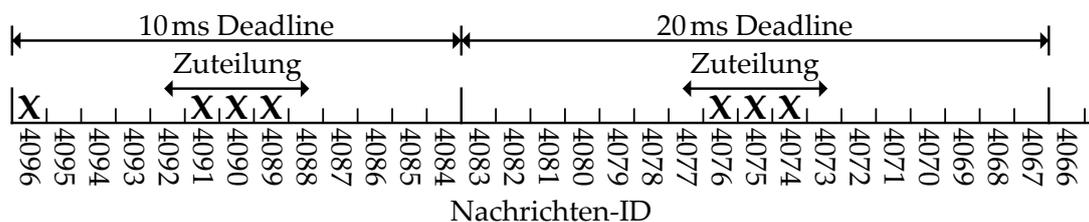


Abbildung 7.7: Zuteilung von IDs in den Deadline-Klassen

Je nach Kommunikationsanforderungen sind auch andere Strategien denkbar. Beispielsweise kann zunächst jede zweite ID vergeben werden. Sind mehrere Subsysteme vorhanden, ist zu berücksichtigen, welche Bit der ID für die Identifizierung des Präfixes verwendet werden. Andernfalls kann beispielsweise die Vergabe jeder zweiten ID dazu führen, dass alle IDs im Präfix eines Subsystems liegen.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Echtzeitverhalten des prioritätsbasierten Medienzugriffsverfahrens für die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug betrachtet. Die Kerneigenschaft des PR MAC Protokolls ist, dass stets die Botschaft mit der aktuell höchsten Priorität im Netz übertragen wird. Kommunizieren Funktionen mit harten Echtzeitanforderungen über dieses Protokoll, ist die maximale Verzögerung im Worst Case zu betrachten. Basierend auf Untersuchungen der Worst-Case-Antwortzeiten von Botschaften auf CAN-Bussen wurde eine auf PR MAC angepasste Bestimmung der Antwortzeiten vorgestellt. Mit Hilfe der Gleichungen können auch Systeme untersucht werden, die in Subsysteme unterteilt sind. Jedes Subsystem kann dabei unabhängig von den anderen betrachtet werden. Soll ein System mit zusätzlichem Ankündigungsslot untersucht werden, kann dieser Slot in der Anzahl der PR-Slots berücksichtigt werden.

Nach Definition des Systemmodells und der verwendeten Variablen, wurden die Gleichungen zur Bestimmung der Worst-Case-Antwortzeiten angegeben. Im Anschluss wurde ein modifizierter Algorithmus vorgestellt, der die Reihenfolge der Prioritäten mit maximaler Robustheit identifiziert. Maximale Robustheit bedeutet in diesem Fall, dass in Zukunft eine hohe Anzahl an Botschaften hinzugefügt werden kann, ohne dass bestehende Botschaften ihre Deadlines verletzen. Der Algorithmus startet mit der niedrigsten Priorität und wählt jeweils die Botschaft aus, die die größte Laxity aufweist. Die Voraussetzung für die Bestimmung der Reihenfolge mit dem gegebenen Algorithmus ist, dass das betrachtete System folgende zwei Kerneigenschaften erfüllt: Die Worst-Case-Antwortzeit einer Botschaft kann sich nicht erhöhen, wenn der Botschaft eine höhere Priorität zugewiesen wird und sie hängt nur von der Menge der Botschaften mit höherer Priorität ab, nicht von deren Reihenfolge.

Nach der Identifizierung der Prioritätsreihenfolge mit maximaler Robustheit wurde diskutiert, wie die gefundene Reihenfolge auf den Adressraum aufgeteilt werden kann. Zur Maximierung der Flexibilität in Bezug auf Änderungen in der Verkehrszusammensetzung können bestimmte ID-Bereiche für verschiedene Deadline-Klassen reserviert werden. Dies führt in der Regel dazu, dass nicht alle IDs genutzt werden können. Jedoch ist dadurch sichergestellt, dass für jede mögliche Verkehrszusammensetzung ausreichend IDs vorhanden sind. Weiterhin wurde die Unterscheidung in Fahrzeugzustände diskutiert. Durch diese Betrachtung können IDs vergeben werden, die zuvor von der Vergabe ausgeschlossen waren. Allerdings geht dies mit einer Reduzierung der Flexibilität einher, da nicht mehr für alle möglichen Verkehrszusammensetzungen ausreichend IDs vorhanden sind. Die Überlappung der IDs bezogen auf die Fahrzeugzustände kann verwendet werden, um die Anzahl zu reservierender IDs je Deadline-Klasse zu bestimmen, damit die Flexibilität maximiert wird.

Zuletzt wurden Strategien für die Vergabereihenfolge der IDs aus den reservierten Bereichen der Deadline-Klassen betrachtet. Eine optimale Strategie existiert nicht, da die unterschiedlichen Anforderungen der Botschaften Einfluss auf die Auswahlstrategie haben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Ansätze zur Flexibilisierung und Vereinfachung der Kommunikation in zukünftigen Fahrzeugbordnetzen betrachtet. Dieses Ziel wird durch die Reduzierung der Anzahl an Leitungen erreicht, die für die Kommunikation benötigt werden. Ein betrachteter Ansatz ist der Einsatz von Funktechnologien. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt jedoch auf dem zweiten Ansatz, der Verwendung der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug. Mit beiden Varianten entfällt die Notwendigkeit dedizierter Kommunikationsleitungen im Kabelbaum. Um die Anforderungen an zukünftige Fahrzeugkommunikationssysteme zu identifizieren, wurde eine Einführung in die heutigen Kommunikationsstrukturen und die dabei verwendeten Technologien gegeben. Für eine erste Realisierung eines Powerline-Kommunikationssystems eignet sich die aktuelle LIN-Infrastruktur. Das Einsparungspotential ist aufgrund der hohen Anzahl an Leitungen groß. Durch die geringen Sicherheitsanforderungen der Funktionen auf den LIN-Bussen kann das Risiko bei einer Fehlfunktion des Systems gering gehalten werden.

Die Funkkommunikation eignet sich besonders für Kommunikationsstrecken, bei denen das Verlegen von Leitungen problematisch ist. Beispiele sind Knick- und Verwindungsstellen beweglicher Teile wie bei Türen oder der Heckklappe. Zur Bewertung von Funktechnologien wurden Messungen des Wirkbereichs durchgeführt. Als Ergebnis zeigt sich, dass mit großen Interferenzen zu rechnen ist. Sowohl durch Funksysteme im Umfeld des betrachteten Fahrzeugs, als auch durch Geräte die durch Insassen ins Fahrzeug gebracht werden, ist mit Störungen zu rechnen. Um die Interferenz aus dem Fahrzeugumfeld zu minimieren, sind die Antennen so zu platzieren, dass die Fahrzeugkarosserie abschirmend wirkt. Durch gerichtete Antennen kann die Interferenz zusätzlich verringert werden. Weiterhin wurde die Koexistenz von Funksystemen im Fahrzeug betrachtet. Durch die Kenntnis der verbauten Systeme kann die Konfiguration angepasst werden, damit die gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Systeme minimiert wird. Allerdings sind neben unbeabsichtigten auch beabsichtigte Störungen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund eignet sich die Funkkommunikation nur für eine geringe Anzahl an Funktionen mit niedrigen Sicherheitsanforderungen.

Die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug besitzt ein großes Potential, da die nötige Verkabelung auf das Minimum reduziert wird. Lediglich die ohnehin vorhandenen Energieversorgungsleitungen werden benötigt. Eine Reihe vorangegangener Messungen der physikalischen Schicht zeigen, dass die Übertragung von PLC-Signalen in Fahrzeugen realisierbar ist. Um die Kosten zu minimieren, werden Standardkomponenten bevorzugt. Daher wurden bestehende Standards betrachtet, die im häuslichen

Bereich bereits weit verbreitet sind. Der HomePlug Green PHY Standard für Smart Grids stellt eine Untermenge des HomePlug AV Standards dar. Neben Smart Grids wird der HomePlug Green PHY Standard zusätzlich bereits für die Lade-Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und den Ladestationen eingesetzt. Durch die Auslegung auf eine kostengünstige Hardware mit robuster Übertragung ist dieser Standard auch für die Kommunikation in Fahrzeugen von Interesse. Die Untersuchungen des Standards in dieser Arbeit zeigen, dass der Protokoll-Overhead bei der Übertragung von fahrzeugtypischen Botschaften mit einer maximalen Nutzdatenlänge von 8 Byte vergleichsweise hoch ist. Daher wird die Übertragung der Nutzdaten in der HomePlug Frame Control vorgeschlagen. Simulationen zeigen, dass der Ersatz der aktuellen LIN-Infrastruktur prinzipiell möglich ist. Durch das CSMA/CA Protokoll kommt es jedoch gerade bei einer hohen Anzahl an Stationen zu Kollisionen. Selbst mit erneuten Übertragungen kollidierter Frames ist der Verlust von Botschaften nicht ausgeschlossen. Weiterhin zeigen die Simulationen, dass mit dem CSMA/CA Protokoll eine deutliche Erhöhung des Verkehrs in Zukunft nicht möglich ist.

In der vorliegenden Arbeit wurden weitere Protokollvarianten entworfen, die weitgehend auf dem HomePlug Standard basieren und mit Modifikationen an der Firmware oder Hardware realisierbar sind. Ein TDMA-System kann zwar den Overhead für einzelne Übertragungen deutlich reduzieren, allerdings ist es nicht für eine großteils ereignisbasierte Kommunikation geeignet, wie sie auf den LIN-Bussen vorzufinden ist. Der vorgeschlagene prioritätsbasierte Medienzugriff (PR MAC) ist besonders für die ereignisbasierte Kommunikation geeignet. Werden eindeutige Nachrichten-IDs als Prioritäten verwendet, können Kollisionen ausgeschlossen werden. Weiterhin wird der Overhead mit diesem System im Vergleich zum CSMA/CA Protokoll verringert, sofern nicht mehr als 14 Prioritätsauflösungsslots verwendet werden. Basierend auf einer Abschätzung sind bereits 12 PR-Slots für eine zukünftige Verkehrserhöhung ausreichend. Um auch periodischen Verkehr effizient und deterministisch zu übertragen, kann PR MAC mit TDMA kombiniert werden.

Ein Nachteil aktueller PLC-Transceiver ist, dass der Energieverbrauch basierend auf einer Analyse verfügbarer Datenblätter im Vergleich zu LIN-Transceivern deutlich erhöht ist. Da verfügbare PLC-Transceiver für den Heimgebrauch konzipiert sind und dort dauerhaft mit der Stromversorgung verbunden sind, stellt die Energieeffizienz der Hardware nicht die höchste Priorität dar. Im Fahrzeug dagegen wirkt sich der Energieverbrauch der Komponenten direkt auf den Kraftstoffverbrauch, die CO₂-Emission und die Reichweite aus. Daher wurden weitere Modifikationen des PR MAC Protokolls vorgeschlagen, mit denen die Einschaltdauer der Transceiver reduziert werden kann. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Kombination aus der Bildung von Subsystemen und der Verwendung eines Ankündigungsslots in Rot+ MAC einen sinnvollen Kompromiss zwischen einem reduzierten Energieverbrauch und geringer Komplexität darstellt.

Zuletzt wurde das Echtzeitverhalten des prioritätsbasierten Medienzugriffs untersucht. Ausgehend von der Bestimmung von Worst-Case-Antwortzeiten in Abhängigkeit der Priorität wurde ein erweiterter Algorithmus entwickelt, der die Priori-

tätsreihenfolge mit maximaler Robustheit in Bezug auf zukünftig hinzukommende Botschaften identifiziert. Im Anschluss wurde diskutiert, wie die gefundene Prioritätsreihenfolge auf den verfügbaren Adressraum aufgeteilt werden kann. Es wurde eine Methode zur Berechnung der zu reservierenden IDs gegeben, um die Flexibilität im Hinblick auf Änderungen in der Verkehrszusammensetzung zu maximieren. Dazu werden ID-Bereiche identifiziert, welche für bestimmte Deadline-Klassen zu reservieren sind. Weiterhin wurden Strategien diskutiert, wie die Vergabe von IDs aus den reservierten Bereichen erfolgen kann.

Die Untersuchungen der vorgeschlagenen Protokollvarianten in dieser Arbeit zeigen, dass die Powerline-Kommunikation im Fahrzeug unter Verwendung von Standardkomponenten mit geringen Modifikationen möglich und vielversprechend ist. Wünschenswert ist, dass Hardwarehersteller bestehende Hardware derart modifizieren, dass diese neben dem Einsatz für Smart Grids auch für den Einsatz im Fahrzeug geeignet ist. Damit können die Stückkosten reduziert werden, was den baldigen Einsatz der Powerline-Kommunikation im Fahrzeug begünstigt.

Abkürzungsverzeichnis

ACK	Acknowledgment
AFH	Adaptive Frequency Hopping
AIFS	Allocation Interframe Space
AVB	Audio Video Bridging
B2BIFS	Beacon-to-beacon Interframe Space
BC	Backoff Counter
BPC	Backoff Procedure Event Counter
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAN	Controller Area Network
CAN FD	CAN with Flexible Data-Rate
CAP	Channel Access Priority
CBTS	Contention-based Time Slot
CBTXOP	Contention-based TXOP
CCA	Clear Channel Assessment
CCo	Central Coordinator
CDMA	Code Division Multiple Access
CE	Consumer Electronics
CFP	Contention-free Period
CFTS	Contention-free Time Slot
CFTXOP	Contention-free TXOP
CIFS	Contention Interframe Space
CP	Contention Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance
CSMA/CR	CSMA with Collision Resolution
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CW	Contention Window
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DC	Deferral Counter
DM	Domänen-Master
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying

DT	Delimiter Type
DVTP	Dynamic Virtual Token Passing
ECU	Electronic Control Unit
EIPR	Equivalent Isotropically Radiated Power
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FC	Frame Control
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
GI	Guard Intervall
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HS-CAN	High Speed CAN
IC	Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Interframe Space
IPP	Inter-PHY Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISP	Inter-System Protocol
ITS	Intelligent Transportation Systems
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
LDPC-CC	Low Density Parity Check - Convolutional Code
LIN	Local Interconnect Network
LoS	Line of Sight
LS-CAN	Low Speed CAN
LTE	Long Term Evolution
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MAC	Media Access Control
MAP	Medium Access Plan
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MOST	Media Oriented System Transport
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSDU	MAC Service Data Unit
NAV	Network Allocation Vector

NIT	Network Idle Time
NTBA	Network Termination for Basic Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PAM	Pulsamplitudenmodulation
PB	PHY Block
PHY	Physical Layer
PID	Protected Identifier
PLC	Power Line Communication
PoD	Power over Data
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PR	Priority Resolution
PRS	Priority Resolution Slot
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RCBTS	Registration Contention-based Time Slot
RIFS	Response Interframe Space
ROBO	Robust OFDM
RTR	Remote Transmission Request
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOF	Start of Frame
STXOP	Shared TXOP
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TS	Time Slot
TXOP	Transmission Opportunity
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Arbeit	6
2.1	Beispielhafte Struktur eines Bordnetzes	11
2.2	Aufbau eines Standard CAN-Frames (CAN 2.0A)	13
2.3	Aufbau eines LIN-Frames	14
2.4	FlexRay Kommunikationszyklus	16
2.5	Verteilung der LIN-Nutzdatenlänge	25
3.1	Aufbau von Sender und Empfänger	34
3.2	Übersicht über das Messraster	35
3.3	Positionen der Sendeantenne im Fahrzeug	35
3.4	Kopfposition bei 2450 MHz	37
3.5	Mittelkonsole bei 2450 MHz	38
3.6	Antennenmodul bei 2450 MHz	39
3.7	Antennenmodul mit metallisierten Scheiben bei 2450 MHz	39
3.8	Fußraum Beifahrer bei 2450 MHz	40
3.9	Mittlerer Pfadverlust bei 2450 MHz	41
3.10	Mittlerer Pfadverlust (Mittelkonsole) 2400-2485 MHz	41
3.11	Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenario	42
4.1	HomePlug Beacon Periode in Abhängigkeit der Netzfrequenz	54
4.2	HomePlug CSMA/CA Medienzugriff	55
4.3	HomePlug Interframe Spaces für Beacon und CSMA Region	57
4.4	HomePlug PPDU-Aufbau bei Verwendung des PB136	58
4.5	G.hn MAC-Zyklen in Abhängigkeit der Netzfrequenz	59
4.6	HD-PLC Beacon Intervall	61
4.7	HD-PLC Contention Periode	61
5.1	Beacon Periode des HomePlug Green PHY	68
5.2	LIN-Knoten (links) und PLC-Knoten (rechts)	70
5.3	LIN Response Space	70
5.4	Nachrichtenabfolge: LIN over Green PHY	71
5.5	Beispiel der Knotenadressierung	75
5.6	Beispiel der Nachrichtenadressierung	75
5.7	PLC_Host_Comp2 OMNeT++ Modul	79
5.8	CSMA/CA ohne Bestätigungen, Priorität CA1	83
5.9	CSMA/CA ohne Bestätigungen, Priorität CA3	84
5.10	CSMA/CA ohne Bestätigungen, gleichverteilte Prioritäten	84
5.11	CSMA/CA ohne Bestätigungen, CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%	85

5.12	CSMA/CA ohne ACKs, 95% Konf., CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%	86
5.13	CSMA/CA mit Bestätigungen, Priorität CA1	87
5.14	CSMA/CA mit Bestätigungen, Priorität CA3	87
5.15	CSMA/CA mit Bestätigungen, gleichverteilte Prioritäten	88
5.16	CSMA/CA mit Bestätigungen, CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%	88
5.17	CSMA/CA mit ACKs, 95% Konf., CA0-CA3: 40%, 30%, 20%, 10%	89
5.18	CSMA/CA mit Bestätigungen, zufällige Prioritäten, 300 Knoten	89
5.19	Dynamische Repriorisierung mit drei Standardprioritäten	90
5.20	CSMA/CA mit Bestätigungen, ohne dynamische Repriorisierung	91
5.21	CSMA/CA mit Bestätigungen und dynamischer Repriorisierung	91
5.22	Dynamische Repriorisierung mit zwei Standardprioritäten	92
5.23	Beacon Periode mit TDMA Medienzugriff	94
5.24	Aufbau der TDMA-Slots	95
5.25	Beispielhafter Nachrichtenablauf mit TDMA Mini-Slots	96
5.26	Reservierung von TDMA-Mini-Slots für periodische Nachrichten	97
5.27	Prioritätsbasierter Medienzugriff mit Zugriffsslots	98
5.28	PR MAC: Unterteilung in Subsysteme	100
5.29	Kollision bei nachträglichem Einstieg in die Prioritätsauflösung	100
5.30	Kombination aus PR MAC und TDMA	101
6.1	PR MAC mit Ankündigungsslot (PR+ MAC)	109
6.2	Hierarchischer Medienzugriff	110
6.3	Maximaler 99% Quantil Durchsatz für PR, PR+ und Rot MAC	112
6.4	Maximaler 99% Quantil Durchsatz des hierarchischen Medienzugriffs	113
6.5	99% Quantil Verzögerung bei PR und PR+ MAC	114
6.6	99% Quantil Verzögerung bei Rot MAC	114
6.7	99% Quantil Verzögerung bei hierarchischem Medienzugriff	115
6.8	Best-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot, H-MAC	117
6.9	Worst-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot, H-MAC	118
6.10	Kombiniertes Zugriffsverfahren: Rot+ MAC	119
6.11	Maximaler 99% Quantil Durchsatz für PR, PR+ und Rot+ MAC	120
6.12	99% Quantil Verzögerung bei Rot+ MAC	120
6.13	Best-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot+ MAC	121
6.14	Worst-Case-Energieverbrauch CSMA/CA, PR, PR+, Rot+ MAC	121
7.1	Taskperiode und Queuing Jitter	127
7.2	Struktur des PR Medienzugriffs	129
7.3	Algorithmus zur Bestimmung der robusten Prioritätsreihenfolge	135
7.4	Worst-Case-Antwortzeiten der 4096 IDs mit unendlicher Periode	136
7.5	Worst-Case-Antwortzeiten der IDs 3840-4096 mit unendlicher Periode	136
7.6	Maximale Anzahl benötigter IDs in Abhängigkeit der Deadline	138
7.7	Zuteilung von IDs in den Deadline-Klassen	140

Tabellenverzeichnis

2.1	Vernetzungstechnologien im Fahrzeug	11
2.2	Bewertung der Vernetzungstechnologien (positiv = wünschenswert) . .	21
2.3	Ereignisbasierte Datenrate in Abhängigkeit der LIN-Datenrate	26
2.4	Mittlere Zykluszeit in Abhängigkeit der Nutzdatenlänge	26
2.5	Mittlere Zykluszeit und Nutzdatenrate aller 27 LIN-Busse	27
2.6	Übertragungsdauer von LIN-Frames	28
2.7	Minimales Intervall und maximale Datenrate auf dem LIN-Bus	28
2.8	CAN-Bus Datenrate ohne Bit-Stuffing	29
2.9	CAN-Bus Datenrate mit Bit-Stuffing	29
2.10	Maximale Ethernet-Framerate	30
3.1	Antennenpositionen im Fahrzeug	35
3.2	Ergebnisse des Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Szenarios	43
3.3	Bluetooth-Klassen der Sendeleistung	45
4.1	Parameter des HomePlug AV Standards	51
4.2	HomePlug AV ROBO Modes	52
4.3	PHY-Datenraten der HomePlug AV ROBO Modes	53
4.4	HomePlug PR-Symbole in Abhängigkeit der Priorität	55
4.5	HomePlug CSMA/CA: CW und DC in Abhängigkeit des BPC	56
5.1	Wichtige Parameter des HomePlug Green PHY Standards	69
5.2	LIN over Green PHY: Minimale Übertragungszeiten	72
5.3	Felder der HomePlug AV Frame Control	73
5.4	HomePlug AV Delimiter-Typen	74
5.5	Weitere Parameter für die Simulation	80
5.6	Alternative Prioritätsverteilung	81
5.7	Maximale CSMA/CA Übertragungsraten	82
5.8	Wartezeiten bei Verkehrswerten bis 700 Frames/s	93
5.9	PR MAC: Anzahl der verfügbaren Prioritäten und Frames/s	99
5.10	Bewertung des PR MAC Protokolls	104
6.1	Szenarien mit Verkehrsklassen und Deadlines	111
7.1	Maximale Anzahl an IDs bei zwei periodischen Verkehrsklassen	138

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen des Autors

- [BBG⁺12a] BLESINGER, Martin ; BIEBL, Erwin ; GEHSITZ, Thomas ; EBERSPÄCHER, Jörg ; FERTL, Peter ; KLEMP, Oliver ; KELLERMANN, Helmut: Angle-Dependent Path Loss Measurements Impacted by Car Body Attenuation in 2.45 GHz ISM Band. In: *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Yokohama, Japan, Mai 2012. – ISSN 1550–2252, S. 1–5
- [GDK⁺14] GEHSITZ, Thomas ; DURNER, Raphael ; KELLERMANN, Helmut ; LIM, Hyung-Taek ; KELLERER, Wolfgang: Priority-Based Energy-Efficient MAC Protocols for the In-Car Power Line Communication. In: *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Paderborn, Deutschland, Dezember 2014, S. 61–68
- [GKK14] GEHSITZ, Thomas ; KELLERER, Wolfgang ; KELLERMANN, Helmut: In-Car Communication based on Power Line Networks / Lehrstuhl für Kommunikationsnetze. 2014 (TR-LKN-2014). – Forschungsbericht. – Veröffentlicht in Proceedings of the 2nd GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication (FG-IVC 2014)
- [GKLK14] GEHSITZ, Thomas ; KELLERMANN, Helmut ; LIM, Hyung-Taek ; KELLERER, Wolfgang: Analysis of Medium Access Protocols for Power Line Communication Realizing In-Car Networks. In: *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. Vancouver, Kanada, September 2014, S. 1–7
- [AGB15] ADAM, Daniel ; GEHSITZ, Thomas ; BAUMGARTEN, Uwe: Cyber Organic Systems Network - a New Network Architecture for Future Vehicles. In: *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. Mailand, Italien, Dezember 2015, S. 6–11
- [BBG⁺12b] BLESINGER, Martin ; BIEBL, Erwin ; GEHSITZ, Thomas ; EBERSPÄCHER, Jörg ; HERVE, Pascal ; KELLERMANN, Helmut: Messung und Simulation der Wellenausbreitung bei 2,4 GHz unter Einfluss der Autokarosserie. In: *Kleinheubacher Tagung*. Miltenberg, Deutschland, September 2012
- [GK15] GEHSITZ, Thomas ; KELLERER, Wolfgang: QoS and Robustness of Priority-Based MAC Protocols for the In-Car Power Line Communication. (2015). – Eingereicht bei IEEE Transactions on Vehicular Technology

Erfindungsmeldungen des Autors

- [GKK] GEHSITZ, Thomas ; KELLERER, Wolfgang ; KELLERMANN, Helmut: *Robuste Prioritätsreihenfolge für Nachrichten auf einem Bussystem*. – Erfindungsmeldung 07/2015
- [KGLa] KELLERMANN, Helmut ; GEHSITZ, Thomas ; LIM, Hyung-Taek: *Kollisionsfreies TDMA/CSMA Medienzugriffsverfahren*. – Erfindungsmeldung 12/2013
- [KGLb] KELLERMANN, Helmut ; GEHSITZ, Thomas ; LIM, Hyung-Taek: *Station und Verfahren zur seriellen Datenübertragung unter dynamischer Repriorisierung von Datenrahmen (data frames)*. – Erfindungsmeldung 12/2013
- [KGLc] KELLERMANN, Helmut ; GEHSITZ, Thomas ; LIM, Hyung-Taek: *Zugriffsverfahren mit Zugriffsslots und Prioritätsauflösung sowie Energiesparoption durch Verwendung von Präfixen*. – Erfindungsmeldung 06/2015
- [KBG] KELLERMANN, Helmut ; BLESINGER, Martin ; GEHSITZ, Thomas: *Verfahren zur Gewährleistung einer störungsfreien Koexistenz drahtloser Verbindungen*. – Patent, Offenlegungstag: 29.05.2013, Aktenzeichen DE 10 2011 087 333.3

Zitierte Veröffentlichungen und Standards

- [ABR⁺93] AUDSLEY, Neil ; BURNS, Alan ; RICHARDSON, Mike ; TINDELL, Ken ; WELLINGS, Andy J.: Applying new scheduling theory to static priority pre-emptive scheduling. In: *Software Engineering Journal* 8 (1993), Nr. 5, S. 284–292
- [ADPT13] ANTONIALI, M. ; DE PIANTE, M. ; TONELLO, A.M.: PLC noise and channel characterization in a compact electrical car. In: *17th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, 2013, S. 29–34
- [Aud91] AUDSLEY, N.C.: *Optimal Priority Assignment And Feasibility Of Static Priority Tasks With Arbitrary Start Times*. 1991
- [BCM11] Broadcom Corporation: *Broadcom BCM60321 200 Mbps HomePlug AV1.1 Powerline Adapter*. Datenblatt, 2011
- [Bel14] BELLO, L.L.: Novel trends in automotive networks: A perspective on Ethernet and the IEEE Audio Video Bridging. In: *IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, 2014, S. 1–8

-
- [Bia00] BIANCHI, G.: Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 18 (2000), März, Nr. 3, S. 535–547
- [Blu14] Bluetooth SIG, Inc.: *Specification of the Bluetooth® System Version 4.2*. Dezember 2014
- [BMW09] BMW GROUP: *Der neue BMW 7er: Entwicklung und Technik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009 (ATZ/MTZ-Typenbuch). – ISBN 9783834807731
- [Bri06] BRIL, R.J.: *Existing worst-case response time analysis of real-time tasks under fixed-priority scheduling with deferred preemption is too optimistic*. Technische Universität Eindhoven (TU/e), Niederlande, 2006
- [Bro14] Broadcom Corporation: *BroadR-Reach® Physical Layer Transceiver Specification For Automotive Applications V3.0*. 2014
- [BV00] BEIKIRCH, Helmut ; VOSS, M: CAN-Transceiver for field bus powerline communications. In: *4th International Symposium on Power-Line Communications (ISPL2000) in Limerick (Irland)*, 2000, S. 257–264
- [BYAH06] BUETTNER, Michael ; YEE, Gary V. ; ANDERSON, Eric ; HAN, Richard: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2006 (SenSys '06), S. 307–320
- [CAN91] Robert Bosch GmbH: *CAN Specification Version 2.0*. 1991
- [CAN12] Robert Bosch GmbH: *CAN with flexible Data-Rate Specification Version 1.0*. April 2012
- [DB07] DAVIS, Robert I. ; BURNS, Alan: Robust Priority Assignment for Fixed Priority Real-Time Systems. In: *28th IEEE International Real-Time Systems Symposium, RTSS*, 2007, S. 3–14
- [DB09] DAVIS, Robert I. ; BURNS, Alan: Robust Priority Assignment for Messages on Controller Area Network (CAN). In: *Real-Time Systems* 41 (2009), Nr. 2, S. 152–180
- [DBBL07] DAVIS, Robert I. ; BURNS, Alan ; BRIL, Reinder J. ; LUKKIEN, Johan J.: Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised. In: *Real-Time Systems* 35 (2007), Nr. 3, S. 239–272
- [DJL⁺13] DEGARDIN, V. ; JUNQUA, I. ; LIENARD, M. ; DEGAUQUE, P. ; BERTUOL, S.: Theoretical Approach to the Feasibility of Power-Line Communication in Aircrafts. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 62 (2013), März, Nr. 3, S. 1362–1366

- [DLD⁺08] DEGARDIN, V. ; LIENARD, M. ; DEGAUQUE, P. ; SIMON, E. ; LALY, P.: Impulsive Noise Characterization of In-Vehicle Power Line. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 50 (2008), November, Nr. 4, S. 861–868
- [DSS⁺12] DOMINIAK, S. ; SERBU, S. ; SCHNEELE, S. ; NUSCHELER, F. ; MAYER, T.: The application of commercial Power Line Communications technology for avionics systems. In: *IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2012, S. 7E1–1–7E1–14
- [Fle10] FlexRay Konsortium: *FlexRay Protocol Specification V3.0.1*. 2010
- [GKO09] GALLI, S. ; KUROBE, A. ; OHURA, M.: The inter-PHY protocol (IPP): A simple coexistence protocol for shared media. In: *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC*, 2009, S. 194–200
- [GNEZ07a] GOURET, W. ; NOUVEL, F. ; EL-ZEIN, G.: High Data Rate Network Using Automotive Powerline Communication. In: *7th International Conference on ITS Telecommunications, ITST '07*, 2007, S. 1–4
- [GNEZ07b] GOURET, W. ; NOUVEL, F. ; EL-ZEIN, G.: Powerline Communication on Automotive Network. In: *IEEE 65th Vehicular Technology Conference, VTC2007-Spring*, 2007, S. 2545–2549
- [GRS96] GEORGE, Laurent ; RIVIERRE, Nicolas ; SPURI, Marco: Preemptive and Non-Preemptive Real-Time UniProcessor Scheduling. <https://hal.inria.fr/inria-00073732>. 1996 (RR-2966). – Research Report
- [Har12] HARTWICH, Florian: CAN with Flexible Data-Rate. In: *13th International CAN Conference (iCC2012)*, Hambach, Germany, 2012
- [HH10] HASHIURA, K. ; HABUCHI, H.: Performance evaluation of the vehicular ad-hoc network using the modified binary countdown scheme. In: *16th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2010, S. 352–356
- [Hom12] HomeGrid Forum: *Multiple Input, Multiple Output - Technology Accelerates Wired Home Networks, White Paper Version 1.0*. 2012
- [HP101] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: *HomePlug 1.0.1 Specification*. Dezember 2001
- [HP105] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: *HomePlug 1.0 Technology White Paper*. 2005
- [HPA05] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: *HomePlug AV White Paper*. 2005
- [HPA12] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: *HomePlug AV Specification Version 2.0*. März 2012
- [HPG10] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: *HomePlug GREEN PHY Specification Release Version 1.00*. Juni 2010

-
- [IEE05] IEEE: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements (IEEE Std 802.11e-2005)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., November 2005
- [IEE10] IEEE: *Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications (IEEE Std 1901-2010)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Dezember 2010
- [IEE11] IEEE: *Standard for Layer 2 Transport Protocol for Time Sensitive Applications in a Bridged Local Area Network, IEEE Std 1722-2011*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Mai 2011
- [IEE12a] HD-PLC Alliance Office: *IEEE 1901 HD-PLC Complete technical overview for full spec design for AV and PC Equipment. Technical Overview Document*. <http://www.hd-plc.org/modules/newsroom/index.php?page=article&storyid=13>. Version: 2012
- [IEE12b] IEEE: *Standard for Ethernet, IEEE Std 802.3-2012 (Revision to IEEE Std 802.3-2008)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2012
- [IEE12c] IEEE: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (IEEE Std 802.11-2012)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., März 2012
- [IEE13] IEEE: *Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications (IEEE Std 1901.2-2013)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013
- [IT10a] ITU-T: *Unified high-speed wire-line based home networking transceivers - Data link layer specification (ITU-T Recommendation G.9961)*. International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector, 2010
- [IT10b] ITU-T: *Unified high-speed wire-line based home networking transceivers - System architecture and physical layer specification (ITU-T Recommendation G.9960)*. International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector, 2010
- [IT11] ITU-T: *Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - Multiple input/multiple output specification (ITU-T Recommendation G.9963)*. International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector, Dezember 2011
- [Kel12] KELLERBAUER, Holger: *Simulation von Powerline-Übertragungstechnologien im SmartGrid-Kontext mit OMNeT++*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2012
- [Kes09] KESKIN, Ugur: *In-vehicle communication networks: a literature survey / Technische Universität Eindhoven (TU/e), Niederlande. 2009. – Computer Science Report*

- [KHN12] MegaChips Corporation: *KHN13200 Single Chip*. Datenblatt, 2012
- [Kle07] Kleer: *Wireless Digital Audio Quality For Portable Audio Applications Whitepaper*. 2007
- [Law10] LAWRENZ, W.: *CAN Controller Area Network: Grundlagen und Praxis*. Hüthig Verlag, 2010. – ISBN 9783778529065
- [Leh90] LEHOCZKY, J.P.: Fixed priority scheduling of periodic task sets with arbitrary deadlines. In: *11th Proceedings of Real-Time Systems Symposium*, 1990, S. 201–209
- [LGSW12] LEWANDOWSKI, C. ; GRONING, S. ; SCHMUTZLER, J. ; WIETFELD, C.: Interference analyses of Electric Vehicle charging using PLC on the Control Pilot. In: *16th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, 2012, S. 350–355
- [LIN06] LIN Consortium: *LIN Specification Package Revision 2.1*. 2006
- [LW82] LEUNG, Joseph Y-T ; WHITEHEAD, Jennifer: On the complexity of fixed-priority scheduling of periodic, real-time tasks. In: *Performance evaluation* 2 (1982), Nr. 4, S. 237–250
- [MOS10] MOST Cooperation: *MOST Specification Rev. 3.0 E2*. 2010
- [MR10] MÜLLER-RATHGEBER, Bernd: *Bordnetze für verteilte heterogene Subsysteme*, Technische Universität München, Dissertation, 2010
- [MSS09] MÜLLER, Denis ; SOMMER, Dirk ; STEGEMANN, Sebastian: *Ausarbeitung: Local Interconnect Network (LIN)*. Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2009
- [NPTP11] NOUVEL, F. ; PHAM, H.M. ; TANGUY, P. ; PILLEMENT, S.: *Experiments of in-vehicle power line Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2011
- [NZC94] NOUVEL, F. ; ZEIN, G.E. ; CITERNE, J.: Code division multiple access for an automotive area network over power-lines. In: *IEEE 44th Vehicular Technology Conference*, 1994, S. 525–529
- [OE10] OTT, A.T. ; EIBERT, T.F.: A 433 MHz-22 GHz Reconfigurable Dielectric Loaded Biconical Antenna. In: *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2010, S. 1–5
- [OG09] OKSMAN, V. ; GALLI, S.: G.hn: The new ITU-T home networking standard. In: *IEEE Communications Magazine* 47 (2009), Oktober, Nr. 10, S. 138–145
- [Phi02] PHILIPPS, Holger: *Hausinterne Stromversorgungsnetze als Übertragungswege für hochratige digitale Signale*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2002

-
- [RAAK12] RAUCH, Sebastian ; AEBERHARD, Michael ; ARDELT, Michael ; KÄMPCHEN, Nico: Autonomes Fahren auf der Autobahn–Eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*, 2012
- [RHL⁺11] RAHMAN, M.M. ; HONG, Choong S. ; LEE, Sungwon ; LEE, Jaejo ; RAZZAQUE, M.A. ; KIM, Jin H.: Medium access control for power line communications: an overview of the IEEE 1901 and ITU-T G.hn standards. In: *IEEE Communications Magazine* 49 (2011), Juni, Nr. 6, S. 183–191
- [Ric09] RICHTER, H.: Elektronik und Datenkommunikation im Automobil / Technische Universität Clausthal. <http://www.in.tu-clausthal.de/fileadmin/homes/techreports/ifi0905richter.pdf>. 2009 (IfI-09-05). – Forschungsbericht
- [SC14] SABOLIC, Dubravko ; CAR, Željka: Stochastic modeling of signal propagation in power-line communication networks. In: *International Journal of Communication Systems* 27 (2014), Nr. 11, 3128–3146. <http://dx.doi.org/10.1002/dac.2530>. – DOI 10.1002/dac.2530. – ISSN 1099–1131
- [TB94] TINDELL, K. ; BURNS, A.: Guaranteeing message latencies on control area network (CAN). In: *Proceedings of 1st international CAN conference*, 1994, S. 1–11
- [TBW95] TINDELL, K. ; BURNS, A. ; WELLINGS, A.: Calculating Controller Area Network (CAN) Message Response Times. In: *Control Engineering Practice* 3 (1995), S. 1163–1169
- [THW94] TINDELL, K. ; HANSSON, H. ; WELLINGS, A.J.: Analysing real-time communications: controller area network (CAN). In: *Proceedings of Real-Time Systems Symposium*, 1994, S. 259–263
- [TJA04] Philips Semiconductors: *TJA1020 LIN transceiver - Product Specification*. Datenblatt, 2004
- [TNM09] TANGUY, P. ; NOUVEL, F. ; MAZIEARO, P.: Power Line Communication standards for in-vehicle networks. In: *9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, 2009, S. 533–537
- [TW11] TANENBAUM, Andrew S. ; WETHERALL, David J.: *Computer Networks*. 5th. Prentice Hall, 2011. – ISBN 978–0–13–212695–3
- [V⁺01] VARGA, András u. a.: The OMNeT++ discrete event simulation system. In: *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*, 2001
- [VRF03] VAN RENSBURG, PA J. ; FERREIRA, Hendrid C.: Automotive power-line communications: favourable topology for future automotive electronic trends. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC'03)*, 2003, S. 103–108

- [Wec14] WECKEMANN, Kay: *Domänenübergreifende Anwendungskommunikation im IP-Basierten Fahrzeugbordnetz*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation, 2014
- [YYH03] YOU, Tiantong ; YEH, Chi-Hsiang ; HASSANEIN, H.: A new class of collision prevention MAC protocols for wireless ad hoc networks. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC '03)* Bd. 2, 2003, S. 1135–1140

Webseiten

- [HDP15] *HD-PLC Alliance*. <http://www.hd-plc.org>, Abruf: 24.06.2015
- [OMN15] *OMNeT++ Discrete Event Simulator*. <https://omnetpp.org/>, Abruf: 25.06.2015