



Matthias Johannes Spägle (Autor) Messtechnisch basierte Modellbildung von Ethernet- Netzwerken im Fahrzeug

Dissertation

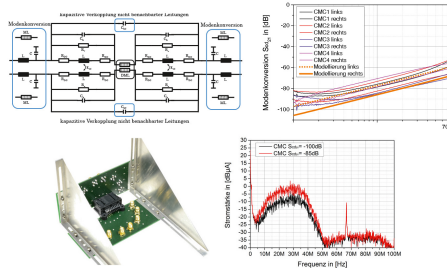
Matthias Johannes Spägle

Messtechnisch basierte Modellbildung von
Ethernet-Netzwerken im Fahrzeug

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \|h\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\Delta_{1, \text{max}} + \Delta_{2, \text{max}} \sin(X_1) (Z_1) - \Delta_{1, \text{max}} - \Delta_{1, \text{max}} \sin(X_2) (Z_1) \right]$$

$$S_{\text{sd}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{(ac + bd)}{c^2 + d^2} + j \cdot \frac{(cb - ad)}{c^2 + d^2} \right] \xrightarrow{\text{Vereinfachungen}} \frac{1}{\sqrt{2}} [0 + j \cdot l]$$

$$S_{\text{detr, rms}} = \left\{ \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \left[\left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[l_1 \left(\frac{Z_{11} + Z_{22}}{2} \right) - l_2 \left(\frac{Z_{12} + Z_{21}}{2} \right) \right] \right] \right\}$$



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6977>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



1 Einleitung

Ausgangssituation

In den vergangenen Jahren ist ein stetiger Zuwachs von elektronischen Komponenten im Fahrzeug zu beobachten. Gerade das Streben nach mehr Komfort, Sicherheit und mobiler Erreichbarkeit im Fahrzeug trägt zu dieser rasanten Entwicklung bei. Für die Vernetzung elektronischer Komponenten sind Kommunikationssysteme erforderlich, die es ermöglichen, das hohe Datenaufkommen zu verarbeiten und im Fahrzeug an die zugehörigen Steuergeräte zu verteilen. Bekannte Bussysteme im Fahrzeug, wie Controller-Area-Network (CAN) oder FlexRay, stoßen hierbei wegen ihrer begrenzten Bandbreite an ihre Grenzen. Ein System, das es erlaubt, Datenraten von bis zu $100 \frac{Mbit}{s}$ über ein Netzwerk zu übertragen, ist Ethernet. Bei Ethernet handelt es sich um ein Kommunikationssystem, das über physikalische Punkt-zu-Punkt Verbindungen und sogenannten „Switches“ ein Netzwerk aufspannt.

Die Datenübertragung von $100 \frac{Mbit}{s}$ stellt eine hohe Herausforderung an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) dar, da aus Kosten- und Gewichtsgründen auf eine Schirmung der Leitung und der Steckverbinder verzichtet werden muss. Bei technisch schlechter Auslegung der Systeme kann es zum Ausfall bzw. einer Störung kommen. Gerade bei sicherheitsrelevanten Systemen (z. B. Airbag oder Fahrerassistenzsystemen) können EMV-Störungen schwerwiegende Folgen haben. Aber auch kundenerlebbare Funktionen, wie Radio oder Fernsehempfang, können dabei gestört werden und das Komforterlebnis beeinträchtigen.

Für die Übertragung von $100 \frac{Mbit}{s}$ liegt es nahe, den Ethernet-Hardware Standard 100Base-TX zu verwenden, da es sich um einen weitverbreiteten Standard handelt und eine Vielzahl von Ethernet Sende-Empfangsmodulen (Transceiver) zur Verfügung stehen. Jedoch weist dieser einige Nachteile für die Fahrzeuganwendung auf, wie z. B. die große Anzahl der benötigten Adern (Kosten) oder das breitbandige Frequenzspektrum (EMV). Aus diesem Grund wird eine spezielle Ethernet-Hardware Variante für die Fahrzeugvernetzung eingesetzt. Es handelt sich hierbei um das Open-Alliance-BroadReach (OABR) Ethernet-System [1]. Dieses Ethernet-System überträgt ebenfalls $100 \frac{Mbit}{s}$, jedoch bidirektional über eine einzige ungeschirmte verdrehte Zweidrahtleitung. Ein weiterer Vorteil besteht in dem bandbegrenzten Nutzspektrum und der Möglichkeit, kostengünstige ungeschirmte Steckverbinder einzusetzen.



Die Herausforderung für den Serieneinsatz im Fahrzeug liegt beim OABR-Ethernet-System hauptsächlich in der Störaussendung. Die Störfestigkeit spielt hier nur eine untergeordnete Rolle, da vorangegangenen Untersuchungen bestätigen, dass es sich um ein sehr störfestes System handelt und keine Ausfälle zu erwarten sind (weder bei der Einkopplung von Gleichtaktstörungen, noch bei Gegentaktstörungen). Trotzdem darf die Störfestigkeit nicht ganz außer Acht gelassen werden, denn mit der Optimierung bzw. Reduzierung der Störaussendung wird auch die Störfestigkeit des Systems verändert. Dies führt dazu, dass die Störfestigkeit weiter erhöht und somit automatisch mit berücksichtigt wird.

Die Störaussendung eines Systems wird in vielen Fällen vorwiegend von Gleichtaktsignalen verursacht. Generell werden Gleichtaktstörungen entweder von externen Quellen auf Kommunikationsleitungen eingekoppelt, oder durch Asymmetrien des Kommunikationssystems selbst hervorgerufen, wie z. B. von asymmetrischen Treiberstufen, Steckverbindern oder Leitungen. Dabei wird ein Teil des Gegentaktsignals in ein Gleichtaktsignal gewandelt, welches z. B. über die Datenleitung abgestrahlt werden kann. Man spricht hierbei von der sogenannten Modenkonversion, die auch in dieser Arbeit im Detail betrachtet wird. Sie ist die Hauptursache der Störaussendung des OABR-Ethernet-Systems. Als Modenkonversion wird aber auch die Umwandlung eines Teils eines Gleichtaktsignals in ein Gegentaktsignal bezeichnet. Diese Art der Modenkonversion kann prinzipiell die Kommunikation des Systems beeinträchtigen (Störfestigkeit). Wie bereits ausgeführt, handelt es sich um ein sehr störfestes System und die Einkopplung von Gegentaktstörungen führt zu keinem Ausfall oder Beeinträchtigung der Kommunikation. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit diese Art der Modenkonversion (Umwandlung in ein Gegentaktsignal) nicht weiter betrachtet.

Jede einzelne Komponente des Ethernet-Systems kann durch ihre Modenkonversionseigenschaften ein Gleichtaktsignal erzeugen und die Störaussendung des Gesamtsystems erhöhen. Aus diesem Grund werden die einzelnen Komponenten des Ethernet-Systems auf ihre Konversionseigenschaften hin analysiert, bewertet, modelliert und Designregeln für ein störarmes Ethernet-System aufgezeigt. Es handelt sich bei den betrachteten Komponenten um eine Gleichtaktdrossel (CMC. Engl.: common-mode-choke), differentielle Mikrostreifenleitungen (DML), konfektionierte Platinensteckverbinder, ungeschirmte verdrehte Zweidrahtleitungen (UTP. Engl.: unshielded-twisted-pair) und konfektionierte In-Line-Steckverbinder.

Problemstellung

Beim Ethernet-System handelt es sich um eine neue Technologie (von der Übertragungsfrequenz, bis hin zu der Übertragungsart), die im Fahrzeug Anwendung findet und mit möglichst

kostengünstigen Verlegetechniken (z. B. ungeschirmte verdrehte Zweidrahtleitung und ungeschirmte Steckverbinder) realisiert werden soll. Die Kombination aus kostengünstiger Verlegetechnik, hoher Übertragungsrate ($100 \frac{Mbit}{s}$), neuem Übertragungssystem und den Modenkonzersionseigenschaften der im Fahrzeug eingebauten Komponenten (z. B. Gleichtaktdrossel oder Steckverbinder) führt zu einer signifikanten Störaussendung und somit zur Überschreitung von EMV-Emissionsgrenzwerten. Aus diesem Grund bedarf es detaillierter Untersuchungen der EMV, insbesondere der Modenkonzersionseigenschaften der Komponenten und des Gesamtsystems. Die Ergebnisse sollen in Designregeln münden und sicherstellen, dass ein OABR-Ethernet-System aus Sicht der EMV im Fahrzeug eingesetzt werden kann. Hierfür ist es erforderlich, dass System systematisch und exakt zu analysieren. Dabei sind die Messtechnik, die analytische Betrachtung und die Simulation notwendige und wichtige Bausteine auf dem Weg zu den Designregeln.

Für die Erstellung von Designregeln bedarf es hinsichtlich der Analyse der Modenkonzersionseigenschaften der Komponenten und des Gesamtsystems neuartiger **Untersuchungstechniken**, einer **analytischen Beschreibung** und neuer **Simulationsmodelle**. Dabei gilt es bei allen Untersuchungen den OABR-Ethernet Frequenzbereich von $1 \text{ MHz} \leq f \leq 1 \text{ GHz}$ (bzw. für die Modenkonzersion von $1 \text{ MHz} \leq f \leq 70 \text{ MHz}$) zu berücksichtigen.

Bereits bei der messtechnischen Ermittlung der Modenkonzersion stößt man mit den herkömmlichen **Untersuchungstechniken**, wie der 4-Port-Messmethode, an seine Grenzen. Eine reproduzierbare und vor allem aussagekräftige Messung ist hiermit nicht möglich. Aus diesem Grund ist es erforderlich, neue und optimierte Messtechnikkonzepte und Messplatinen zu entwickeln, die es erlauben die Modenkonzersion aller Komponenten exakt und über den gesamten Frequenzbereich zu ermitteln. Dabei muss besonders auf eine exakte Symmetrie der Messaufbauten geachtet werden.

Mit den in der Arbeit neu entwickelten Messtechnikkonzepten ist es möglich, die Konverzision von Komponenten exakt und reproduzierbar zu ermitteln, jedoch gibt diese keinen Aufschluss über die Ursache der Modenkonzersion und welche Asymmetrieeffekte dazu führen. Diese Informationen sind aber zwingend erforderlich, um Komponenten mit geringer Modenkonzersion optimieren oder neu entwickeln zu können. Daher wird in dieser Arbeit die **analytische Beschreibung** von Asymmetrien durchgeführt, die es erlaubt, Ursache und Einflussfaktoren der Asymmetrien im Detail herauszustellen und es damit ermöglicht, konversionsarme Komponenten zu entwickeln.

Einer der anspruchsvollsten Punkte in dieser Arbeit ist die Entwicklung von **Simulationsmodellen** des Ethernet-Systems bzw. der einzelnen Komponenten. Vor allem die Modellierung der Modenkonzersion, die in bisher bekannten Modellen mit dem geforderten



Frequenzbereich von $1 \text{ MHz} \leq f \leq 70 \text{ MHz}$ nicht vorzufinden sind stellt eine große Herausforderung dar. Die Simulation stellt mit den neuen Modellen einen erheblichen Mehrwert für die Entwicklung dar, da auf Basis der Simulation vorab Aussagen über das Störaussendungsverhalten des Ethernet-Systems getätigt werden können. Durch die Variation der einzelnen Komponenten (und deren Modenkonzersion) innerhalb der Simulation erhält man auf schnelle und kostengünstige Art und Weise ein aussagekräftiges Störaussendungsergebnis. Hierfür ist es jedoch erforderlich, alle Komponenten und das gesamte System hinsichtlich ihrer Hochfrequenzeigenschaften (HF-Eigenschaften) exakt zu modellieren. Die Herausforderung dabei stellt vor allem das Nachbilden der Modenkonzersionseigenschaften aller Komponenten von $1 \text{ MHz} \leq f \leq 70 \text{ MHz}$ und aller restlichen HF-Parameter von $1 \text{ MHz} \leq f \leq 1 \text{ GHz}$ dar.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine OABR-Ethernet-Übertragungsstrecke ($100 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$) systematisch hinsichtlich der Störaussendung und der HF-Eigenschaften analytisch beschrieben und modelliert. Es werden erstmals detaillierte Designregeln zur Optimierung des EMV Verhaltens aufgestellt.

Ein Schwerpunkt der Arbeit ist die analytische Beschreibung der Modenkonzersion von nicht verkoppelten und verkoppelten Systemen bzw. Komponenten. Die entwickelte analytische Beschreibung zeigt auf, welche Parameter zur Modenkonzersion beitragen. Weiter ergibt sich aus der analytischen Beschreibung eine Priorisierung und Gewichtung der Einflussfaktoren. Hiermit wird eindeutig dargestellt, welcher Parameter mit welchem Gewichtungsfaktor zur Modenkonzersion beiträgt. Die Einflussfaktoren sind in Tabelle 1.1 zu sehen. Einfluss auf die Modenkonzersion einer Komponente haben demnach die 3-Port-Messtechnik an sich, die Länge und die Impedanz der Leitungen.

| Einflussfaktoren | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| $\Delta_{1Imag}, \Delta_{2Imag}$ | l_1, l_2 | | Z_{L1}, Z_{L2} | |
| <u>ITF</u> und <u>TF</u> | $\max l_1, l_2$ | Δl | $\max Z_{L1}, Z_{L2}$ | ΔZ_L |
| 3-Port-Messmethode | Gesamtleitungslängen | Leitungslängendifferenz | Leitungsimpedanzen | Leitungsimpedanzdifferenz |

Tabelle 1.1 – Einflussfaktoren der Modenkonzersion in einer 3-Port-Messanordnung

Die Auswertung hinsichtlich der Gewichtung der Einflussparameter ist in Tabelle 1.2 dargestellt. Längenunterschiede und die Gesamtleitungslänge einer Komponente sind demnach

Hauptverursacher der Modenkonzersion, gefolgt von der Leitungsimpedanz und der Leitungsimpedanzdifferenz.

| Gewichtung | | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 Δl | 2 $\max l_1, l_2$ | 3 $\max Z_{L1}, Z_{L2}$ | 4 ΔZ_L |
| Leitungslängen- differenz | Gesamt- leitungslängen | Leitungs- impedanzen | Leitungsimpedanz- differenz |

Tabelle 1.2 – Gewichtung der Einflussfaktoren, die bei Komponenten zur Modenkonzersion führen

Neben den Erkenntnissen über die Einflussfaktoren ist ein weiterer Schwerpunkt die Modellbildung und Verifikation der HF-Parameter der Komponenten. Hinsichtlich der Messtechnik ist es erforderlich, Messadapter zu entwickeln, die es erlauben, mit hoher Genauigkeit Schlüsselparameter wie z. B. die Modenkonzersionsparameter zu ermitteln. Die Entwicklung der Messadapter zeigt, dass dies lediglich durch hochsymmetrische Auslegung der Messaufbauten zu realisieren ist. Als Designgrundlage dient hier vor allem Tabelle 1.2, die die Gewichtung der Einflussfaktoren aufzeigt. Es stehen somit für alle Komponenten (differentielle Mikrostreifenleitung, Gleichtaktdrossel, konfektionierte Platinensteckverbinder, konfektionierte In-Line-Steckverbinder und UTP-Leitungen) Messaufbauten zur Verfügung, die es ermöglichen, die Modenkonzersion sehr genau zu ermitteln.

Mit Hilfe der hochsymmetrischen Messaufbauten können nun auch Schlüsselkomponenten (wie z. B. die Gleichtaktdrossel) modelliert werden. Die entwickelten Messadapter erlauben es, alle S-Parameter der Komponenten vollumfänglich und reproduzierbar darzustellen. Daraus werden Modelle für die Ethernet Komponenten abgeleitet. Im Vordergrund steht dabei die Entwicklung von Modellen, die im relevanten Frequenzbereich eine hohe Genauigkeit liefern.

Die Modelle bilden neben den symmetrischen Parametern (wie z. B. die Gegentakt- oder Gleichtaktübertragung) auch die asymmetrischen Parameter (Modenkonzersion) nach. Zusätzlich sind bei der Stecker- und Entdrillungsmodellierung (für die Konfektionierung des Steckverbinders muss die verdrehte Zweidrahtleitung über eine gewisse Länge entdrillt werden) alle Kreuzkonversionsparameter (wie z. B. das Übersprechen in einem Steckverbinder) berücksichtigt. Als Besonderheit wird bei den Gleichtaktdrosseln auch das Impedanzverhalten in die Modellierung einbezogen. Die Modelle sind anhand von Messungen im Detail verifiziert.



Es ist gelungen, die Modelle trotz der geforderten hohen Genauigkeit und dem großen Frequenzbereich für den täglichen Praxiseinsatz zu entwickeln. Das bedeutet, dass die Komplexität der Modelle beherrschbar bleiben muss, sodass das Modell gut verständlich im Alltag eingesetzt und in andere Simulatoren importiert werden kann.

Neben den Modellen der Komponenten wird auch die Nachbildung von EMV-Komponententests in die Simulation mit eingebracht. Es ist somit möglich, mit der Simulation Komponententests, wie zum Beispiel CV-Test¹, CP-Test² und RE-Test³ „per Knopfdruck“ in der Simulation durchzuführen. Man erhält dadurch die Möglichkeit, schnell und kostengünstig Aussagen über die Störaussendung des Systems bei Änderung einer Komponente (z. B. Pinning-änderung am Steckverbinder, neuer Verlegeweg von DMLs oder Änderung der Entdrilllänge) zu erlangen.

Aus den einzelnen Komponentenmodellen kann eine spezifische Ethernet-Übertragungsstrecke zusammengestellt werden. Alle Modelle sind vollumfänglich parametrierbar. Der Übertragungsstrecke kann so zum Beispiel ein oder mehrere In-Line-Steckverbinder hinzugefügt, Pinningvorgaben am Steckverbinder geändert, die Drossel ausgetauscht, die DMLs anders verlegt und die Entdrillung an den Steckverbindern variiert werden. Jede Änderung kann dann EMV-technisch analysiert und ausgewertet werden. In Abbildung 1.1 ist beispielhaft eine Ethernet-Übertragungsstrecke dargestellt und besteht aus zwei Physical-Layer-Einheiten und einem Kanal. Eine Physical-Layer-Einheit besteht aus einem Sender oder Empfänger, eventuell einem Tiefpassfilter (LPF. Engl.: low-pass-Filter), aus differentiellen Mikrostreifenleitungen, einer CMC, einer Terminierung und DC-Block sowie einem Platinensteckverbinder und der Entdrillung der angeschlagenen UTP-Leitung. Der Kanal wird durch eine UTP-Leitung beschrieben, die wiederum auch In-Line-Steckverbinder und die Entdrillung der angeschlagenen Leitung beinhalten kann.

Aus den messtechnischen und analytischen Erkenntnissen werden Designregeln für eine emissionsoptimierte OABR-Ethernet-Übertragungsstrecke abgeleitet, sodass eine Einhaltung der CMC Limits nach Class B [43] für alle Komponenten eingehalten werden kann. Es werden Designregeln für Gleichtaktdrosseln, differentielle Mikrostreifenleitungen, Steckverbinder (90°-Platinensteckverbinder und In-Line-Steckverbinder) und die Konfektionierung/Entdrillung von den Steckverbindern ermittelt. Dabei zeigt sich, dass bei einer Gleichtaktdrossel auf eine symmetrische (Längenunterschied $\Delta l \leq 4$ mm), impedanzkontrollierte ($50 \Omega \leq Z_{Li} \leq 290 \Omega$) und kurze Anbindung ($l_i \leq 5$ mm) zwischen Gehäuse und Ringkern/Stabkern zu achten ist. Eine weitere Designregel bei der Verwendung von differentiellen Mikrostreifenleitungen besagt, dass der Längenunterschied zwischen den Adern $\Delta l \leq 3.5$ mm

¹Kapazitive Spannungsmessung. Engl.: capacitive-voltage test

²Stromzangenmessung. Engl.: current-probe test

³Antennenmessung. Engl.: radiated-emission test

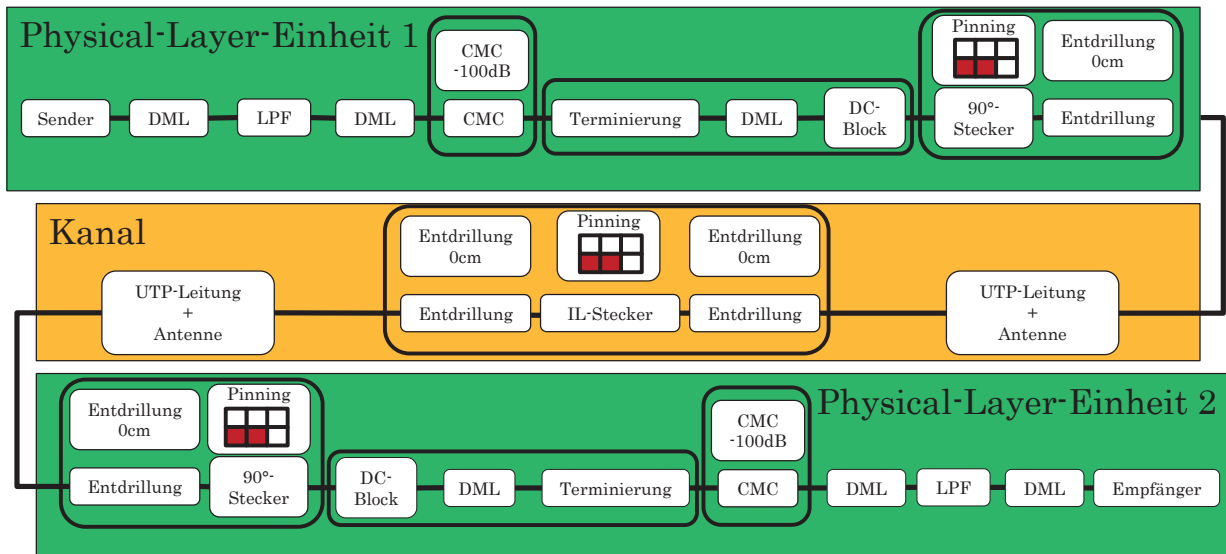




Abbildung 1.1 – Blockschaltbild des untersuchten Gesamtsystems

und die Impedanz der Einzeladern $49.95\ \Omega \leq Z_{Li} \leq 50.05\ \Omega$ betragen darf. Der Einsatz von 90°-Platinensteckverbinder erfordert das Einhalten von Pinningvorgaben. Für den 90°-Platinensteckverbinder kann mit der Pinningvariante  der Grenzwert eingehalten werden. Dabei stellen jeweils die roten und blauen Flächen ein OABR-Ethernet-System dar. Bei den weiß hinterlegten Flächen handelt es sich um nicht bestückte Gehäusekammern. Eine weitere Verringerung der Konversion ist mit dem Pinning  zu erreichen. Für einen In-Line-Steckverbinder ergeben sich die gleichen Anforderungen an das Pinning. Bedingt durch die Pinningvorgaben der Steckverbinder ist auch die Geometrie der Anschlussleitungen bzw. der Konfektionierung vorgegeben. Es ist bei der Konfektionierung darauf zu achten, dass der Längenunterschied $\Delta l \leq 4\ \text{mm}$ und die Entdrilllänge $l_{\text{Entdrillung}} \leq 10\ \text{mm}$ betragen.

Die Designregeln geben erstmals Aufschluss darüber, wie die Modenkongression der Komponenten verringert und somit die Störaussendung des Ethernet-Gesamtsystems minimiert werden kann. Mit Hilfe der Designregeln ist es möglich, die Auslegung der Übertragungsstrecke insbesondere hinsichtlich EMV und Kosten zu optimieren.

Gliederung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 2 grundlegende, die Themenstellung betreffende Aspekte der EMV, der Streuparameter und des OABR-Ethernet-Systems behandelt. Bei der EMV werden insbesondere die Übertragungsarten von Signalen und die dadurch hervorgerufenen Störaussendungen beschrieben. Weiter wird bei den Streuparametern die



Beschreibung von passiven Mehrtorsystemen und die Modenkonzersion aufgezeigt. Im letzten Abschnitt des Grundlagenkapitels wird die OABR-Schnittstelle schematisch dargestellt und die Funktion des Ethernet-Systems im Detail erläutert.

Kapitel 3 beschreibt die Asymmetrien im Ethernet-System. Hierbei werden die messtechnischen Herausforderungen und die optimierte Messtechnik zur Modenkonzersionsermittlung vorgestellt. Weiter wird in diesem Kapitel die analytische Beschreibung durchgeführt, mit der sich die Ursache der Modenkonzersion mathematisch beschreiben und erklären lässt. Mit Hilfe der analytischen Beschreibung wird ebenfalls aufgezeigt, welche Parameter bzw. Effekte der Ethernet-Komponenten zur Modenkonzersion beitragen.

In Kapitel 4 wird die Modellierung der Übertragungsstrecke thematisiert. Hierbei werden die einzelnen Komponenten (Gleichtaktdrossel, differentielle Mikrostreifenleitungen, automotiv Steckverbinder, Konfektionierung von Steckverbindern und UTP-Leitung) HF-technisch analysiert, ein Simulationsmodell angefertigt und verifiziert. Zusätzlich wird in diesem Kapitel die Modellierung von Standard EMV-Komponententests aufgezeigt, mit deren Hilfe in der Simulation Komponententests (CV-Test, CP-Test und RE-Test) nachgebildet werden können. Die Herausforderung bei der Modellierung liegt insbesondere in dem großen Frequenzbereich, den die Modelle widerspiegeln sollen und der geforderten Genauigkeit der Modelle hinsichtlich ihrer HF-Eigenschaften über den gesamten Frequenzbereich. Der betrachtete Frequenzbereich beträgt für die Modenkonzersionsparameter auf Grund des Nutzspektrums des Ethernet-Systems 1 MHz bis 100 MHz und bei allen weiteren HF-Parametern 1 MHz bis 1 GHz.

Kapitel 5 beschreibt die Systemanalyse des Ethernet-Systems. Es werden die Störpotentiale der einzelnen Komponenten aufgezeigt und bewertet. Weiter werden Designregeln dargestellt, die es erlauben, eine störarme Ethernet-Übertragungsstrecke zu entwerfen. Zusätzlich werden das Gesamtmodell des Ethernet-Systems und die Verifikation besprochen.

Die Arbeit endet mit Kapitel 6, in welchem die Anwendungsmöglichkeiten beschrieben werden und ein Ausblick der Arbeit gegeben wird.

2 Grundlagen

Das zweite Kapitel gibt einen Einblick in die Aspekte der EMV, welche für die Störaussendung des OABR-Ethernet-Systems und somit für eine Bewertung desselben, relevant sind. Die Schwerpunkte liegen auf den Streuparametern, der EMV und der Funktionsweise bzw. den Komponenten des OABR-Ethernet-Systems. Die generellen Grundlagen und darüber hinausgehende Details sind in den Literaturquellen [2, 20, 21, 23–36, 49] zu finden.

2.1 OABR-Ethernet-System

Das OABR-Ethernet-System hat seinen Ursprung in der Consumer-Welt. Die zugrunde liegende Technik ist entwickelt worden, um in Häusern Ethernet-Signale über vorhandene Strukturen zu übertragen (z. B. Telefonleitungen). Dabei ist das System darauf ausgelegt, Signale über Leitungen zu übertragen, die hochfrequenztechnisch nicht den Ethernet-Standard-Leitungen (z. B. Category-5) entsprechen. Mit dem System ist es möglich, $100 \frac{Mbit}{s}$ über ein Aderpaar zu übertragen anstelle der üblichen zwei Aderpaare. Dies wird im Wesentlichen durch eine bidirektionale Übertragungstechnik und eine dreistufige Puls-Amplituden-Modulation (PAM3) realisiert. Es handelt sich, wie auch beim Standard 100Base-TX Ethernet, bei den Kommunikationsstrecken um physikalische Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Details können aus den Unterlagen der OPEN-Alliance [1] entnommen werden. Allgemeine und weitere grundlegende Informationen zum EMV-Verhalten eines Ethernet-Systems sind den Quellen [3, 92, 98–101] zu entnehmen.

2.1.1 Die Signalübertragung

Bei der Signalübertragung handelt es sich um ein PAM3-Signal, das über eine UTP-Leitung (bidirektional) übertragen wird. Die zu sendenden Daten werden durch interne digitale Signalbearbeitung auf den PAM3-Leitungscode mit einer Baudrate von 66.6MBAud bzw. einer Pulsdauer von 15 ns gewandelt. Dies entspricht einer Nutzsinalbandbreite von ca. 27 MHz. Jeder Pegelwechsel im Zeitsignal stellt eine Übertragung von 1.5Bit dar. Die typische differentielle Amplitude des OABR-Ethernet Zeitsignals beträgt ± 1 V. Das Zeitsignal einer



PAM3-Übertragung mit einer Amplitude von $\pm 1\text{ V}$ ist in Abbildung 2.1(a) schematisch zu sehen.

Das Frequenzspektrum eines PAM3-Signals weist neben seiner Grundwelle auch Oberwellen auf, die sich bis in den Gigahertz Frequenzbereich erstrecken. Betrachtet man die kritischsten EMV-Frequenzbereiche, so sind vor allem die Bereiche Mittelwelle MW, Kurzwelle KW, Ultrakurzwelle UKW und die TV-Bänder TVI - TVIV/V hervorzuheben. Gerade in diesen Frequenzbereichen sind das PAM3-Nutzsignal bzw. dessen Oberwellen vorzufinden und können den Empfang signifikant beeinträchtigen. Damit dies nicht geschieht, wird das System so ausgelegt, dass die Oberwellen unterdrückt werden und nur noch die Grundwelle bis 66.6 MHz auf die UTP-Leitung trifft. Dies kann über internes Pulse Shaping des Halbleiters oder über einen externen Tiefpassfilter (LPF) erfolgen [4–8].

Man erkennt den Vorteil des Pulse Shaping in Abbildung 2.1(b). Es ist zu sehen, dass die Oberwellen oberhalb einer Frequenz von 66.6 MHz unterdrückt bzw. bedämpft und mögliche Störungen des UKW-Bereichs und der TV-Bänder dadurch verringert werden. In Abbildung 2.1(b) sind das Frequenzspektrum eines simulierten PAM3-Signals (mit und ohne Pulse Shaping) sowie die kritischen EMV-Bereiche aufgezeigt.

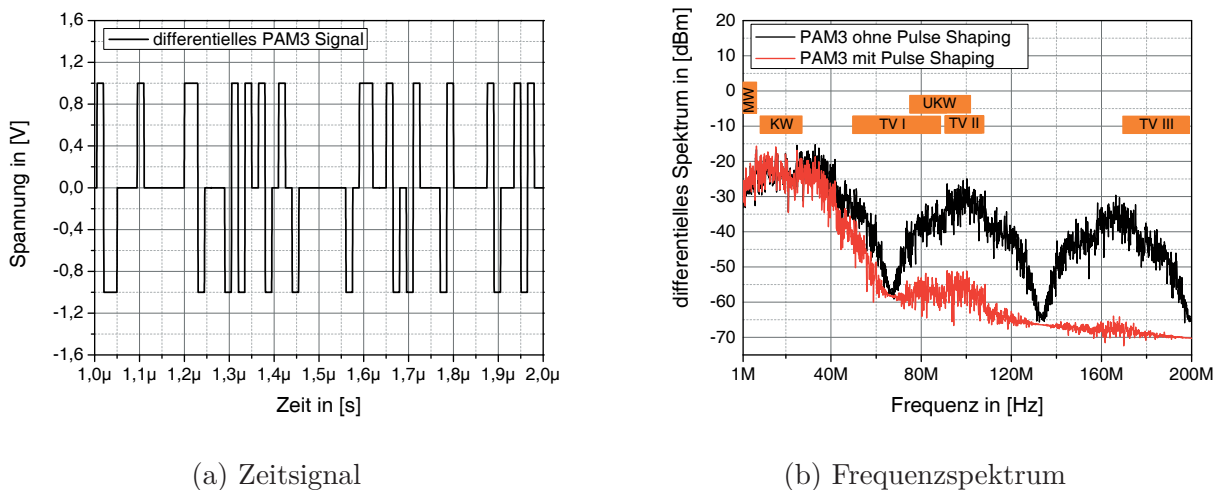


Abbildung 2.1 – PAM3 Zeitsignal und Frequenzspektrum

2.1.2 Die Übertragungsstrecke

In diesem Abschnitt wird der grundsätzliche Aufbau einer OABR-Ethernet-Übertragungsstrecke aufgezeigt. Das Ethernet-System kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

1. Ethernet-Steuergeräte
2. Ethernet-Kanal