

# Störungen in Powerline Datenübertragungssystemen durch Schaltvorgänge im Bordnetz

Alexander Zeichner, TU Dortmund, Dortmund, alexander.zeichner@tu-dortmund.de

Stephan Frei, TU Dortmund, Dortmund, stephan.frei@tu-dortmund.de

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Vorgehen zur simulationsbasierten Analyse der Signalintegrität von Kfz-Powerline Datenübertragungssystemen im Zeitbereich beschrieben. Besonders wird auf die Problematik von transienten Pulsen, hervorgerufen durch Schaltvorgänge im Bordnetz, eingegangen. Dazu werden Powerline-Transceiver-Verhaltensmodelle für die Modulation und Demodulation in VHDL-AMS entwickelt und verlustbehaftete Leitungsmodelle verwendet. Des Weiteren wird eine verzweigte Bordnetztopologie untersucht und der Einfluss von Überspannungsschutzelementen auf die Signalintegrität analysiert.

## Abstract

In this document simulation-based signal integrity analysis on vehicle Power-line data transmission systems is presented. Main focus is the transient analysis dealing with the problem of EMI noise pulses generated during operation of in-vehicle power distribution system. Behavioral models for modulation and demodulation in VHDL-AMS have been developed and further integrated with lossy Transmission Line (TL) models. Additionally, the influence of over-voltage protection on signal integrity has been examined on on-board network topologies.

## 1 Einleitung

Das Energiebordnetz in Fahrzeugen dient dazu, elektrische Verbraucher mit Energie zu versorgen. Zu den Verbrauchern zählen unter anderem Steuergeräte, Sensoren und Aktuatoren. In aktuellen Kfz findet die Datenkommunikation zwischen diesen Systemen je nach notwendiger Datenrate und Störfestigkeitsanforderungen meist über LIN, CAN, FlexRay, Ethernet oder MOST statt. Abgesehen von der Energieversorgung über die Bordnetzleitungen nutzen die erwähnten Bussysteme meist ein oder zwei zusätzliche Kupferleitungen zur Übertragung von Daten. Nutzt man das Energiebordnetz um Daten zu übertragen kann die Komplexität der Verkabelung reduziert und Gewicht sowie Kosten können verringert werden. Diese Datenübertragung bringt allerdings erhebliche Herausforderungen mit sich. Die Impedanzverhältnisse sind nicht für eine Datenübertragung optimiert, bzw. im Gegenteil auf einen Kurzschluss von hochfrequenten Signalen ausgelegt. Weiterhin überlagern sich durch das Rauschen der digitalen Systeme und das Zuschalten sowie Abschalten von Verbrauchern erhebliche Störungen auf den Leitungen.

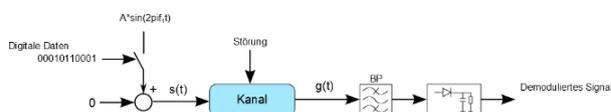
In dieser Arbeit wird simulatorisch untersucht, wie sich Schaltvorgänge auf die Signalintegrität der Datenübertragung auswirken und verschiedene Maßnahmen werden untersucht. Dafür werden zwei Modulationsverfahren (ASK und FSK), die für eine PLC (Power Line Communication) Datenübertragung im Fahrzeug geeignet erscheinen auf ihre Störfestigkeit untersucht. Der Einfluss von Schaltvorgängen auf das demodulierte Signal wird analysiert und Gegenmaßnahmen zur Verbesserung werden vorgestellt.

## 2 Grundlagen von Kfz-PLC Übertragungssystemen

Grundsätzlich ist die Verkabelung des Energiebordnetzes dazu ausgelegt, Gleichstrom zu übertragen. Prinzipiell ist das Bordnetz aber auch in der Lage, HF-Signale zu übertragen. Mit zunehmender Frequenz werden die Signale stark gedämpft. So dass eine Übertragung problematisch wird. Auch sind bei hohen Frequenzen viele Funkdienste zu finden, die nicht gestört werden dürfen. Niedrige Frequenzen sind durch leistungselektronische Schaltvorgänge stark belastet, so dass auch diese Frequenzen für eine Datenübertragung nicht in Frage kommen. Somit bleibt für die Signalübertragung nur ein schmaler Frequenzbereich. In diesem Beitrag werden zwei Modulationsverfahren (ASK und FSK) modelliert und auf Robustheit hinsichtlich Signalintegrität untersucht. Weitere Modulationsverfahren, wie z.B. die PSK oder QPSK finden in [4] und [5] bereits Anwendung.

### 2.1 Amplitudenmodulation (ASK)

Die Amplitudenmodulation für die binäre Datenübertragung (**Bild 1**), auch ASK (Amplitude Shift Keying) genannt, ist ein sehr einfaches Modulationsverfahren. Ein Sinusträger wird dabei, je nach binärem Zustand ein- bzw. ausgeschaltet.

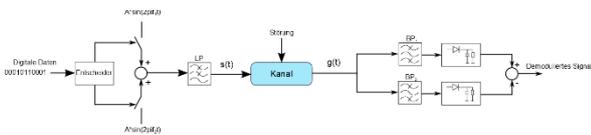


**Bild 1** Signalflussgraph der ASK

Das resultierende Sendesignal  $s(t)$  durchläuft den Kanal, der mit Störungen beaufschlagt ist. Im Empfänger findet eine Bandpassfilterung des Signals  $g(t)$  statt. Anschließend wird das Signal mit einem Einhüllen-Detektor demoduliert. Durch Abtasten des demodulierten Signals kann dann der binäre Datenstrom wiedergewonnen werden.

## 2.2 Frequenzmodulation (FSK)

Bei der Frequenzmodulation (FSK – Frequency Shift Keying) wird im Sender, je nach binärem Zustand der Eingangsdaten, zwischen zwei Sinusträgern geschaltet. Die Frequenzen der beiden Sinusträger unterscheiden sich und repräsentieren die binären Zustände. Das Ausgangssignal  $s(t)$  des Senders durchläuft den störbehafteten Kanal und kommt als verzerrtes Signal  $g(t)$  am Empfänger an.



**Bild 2** Signalflussgraph der FSK

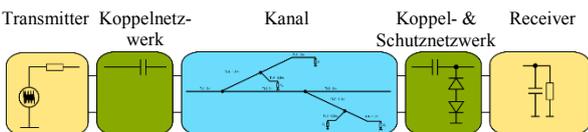
Im Receiver werden aus dem empfangenen Signal die beiden Trägersignale durch zwei Bandpassfilter mit den jeweiligen Mittenfrequenzen separiert. Anschließend werden sie mit zwei Einhüllenden-Detektoren demoduliert. Die Differenzbildung ergibt das demodulierte Gesamtsignal, welches durch Abtastung in eine digitale Bitfolge umgewandelt werden kann.

## 3 Simulationsbasierte Störfestigkeitsanalyse

In diesem Abschnitt werden die Modelle und die Methodik beschrieben, mit der die Störfestigkeitsanalyse für Pulse im Bordnetz durchgeführt wird. Als Modellierungssprache wurde VHDL-AMS verwendet. Damit ist es möglich, gekapselte Modelle mit definierten Ports zu erstellen und beliebig zu kombinieren.

### 3.1 Simulationsmodell

Das entwickelte Gesamtsimulationsmodell besteht im Wesentlichen aus fünf Untermodellen. Damit kann eine Punkt-zu-Punkt PLC auf physikalischer Ebene im Zeitbereich simuliert werden (**Bild 3**). Im Weiteren werden die Modelle vorgestellt, aber nicht auf die genaue Implementierung in VHDL-AMS eingegangen.



**Bild 3** Modellübersicht

Das Transmittermodell besteht aus einer idealen Signalquelle und einem Quellenwiderstand. In der Signalquelle wird das Signal mathematisch jeweils nach den vorge-

stellten Funktionsprinzipien der ASK bzw. FSK (Abschnitt 2) zwischen dem internen Referenzknoten und einem freien Knoten im Modell als ideale Spannung erzeugt. Zwischen dem freien Knoten und dem Ausgangsport des Modells wird zur Nachbildung einer Quellenimpedanz ein Widerstand von 90 Ohm verwendet.

Das Receivermodell hat einen hochohmigen Eingangswiderstand von 100 kOhm mit einer parasitären Kapazität von 10 pF am Modelleingangsport. Der Spannungsabfall an der Eingangsimpedanz des Receivers wird entsprechend der vorgestellten Prinzipien (Abschnitt 2) mathematisch demoduliert. Im Einhüllenden-Detektor wird mathematisch eine ideale Diode nachgebildet. Ein nachgeschaltetes RC-Glied sorgt für die Tiefpassfilterung. Die vorgeschalteten Bandpassfilter werden als Übertragungsfunktionen im Laplacebereich formuliert, da VHDL-AMS die Möglichkeit bietet, solche Funktionen direkt im Zeitbereich zu simulieren. Es werden Bandpassfilter 2. Ordnung der Form

$$H(s) = \frac{s \frac{2D}{\omega_0}}{1 + s \frac{2D}{\omega_0} + s^2 \frac{1}{\omega_0^2}}$$

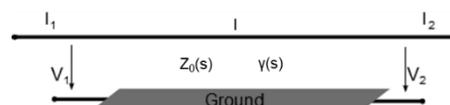
verwendet, wobei  $D$  der Dämpfungsgrad ist und die Bandbreite  $B$  des Filters über die Formel

$$B = 2D \frac{\omega_0}{2\pi}$$

im Zusammenhang steht. Die Mittenfrequenz des Filters wird mit  $\omega_0$  festgelegt.

Zur Kopplung der Transmitter- und Receivermodelle an das Kanalmodell und gleichzeitig zur Entkopplung von der DC Spannung wird eine Kapazität verwendet. Als Schutzelemente vor der Überspannung werden zwei Zener-Diodenmodelle am Eingang des Receivers angeschlossen.

Ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtmodells ist die Verkabelung. Ein verlustbehaftetes Leitungsmodell [1] wird verwendet.



**Bild 4** Leitungsmodell

Die Spannungs- und Stromverhältnisse am Anfang und Ende einer Einzelleitung über Massefläche können im Frequenzbereich beschrieben werden mittels [3]:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(s)l) & Z_0(s)\sinh(\gamma(s)l) \\ -\frac{1}{Z_0(s)}\sinh(\gamma(s)l) & \cosh(\gamma(s)l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix}$$

In der frequenzabhängigen Ausbreitungskonstante  $\gamma(s)$  und Wellenwiderstand  $Z_0(s)$  werden der Gleichstromwiderstand  $R_{DC}$  und der Skineffekt  $R_s$  berücksichtigt:

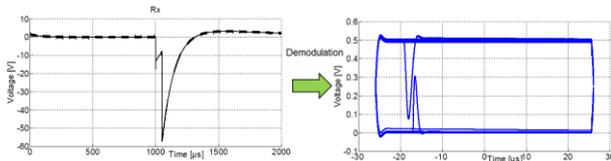
$$Z_0(s) = \sqrt{\frac{R'_{DC} + R'_S \sqrt{s} \sqrt{2} + sL'_e}{sC'}}$$

$$\gamma(s) = \sqrt{(R'_{DC} + R'_S \sqrt{s} \sqrt{2} + sL'_e) sC'}$$

Für die Simulation im Zeitbereich müssen  $Z_0$  und  $\gamma$  zunächst durch rationale Funktionen approximiert werden. Daraus kann direkt die lineare Differentialgleichung gebildet werden. Auch hierfür wird eine VHDL-AMS Funktion verwendet. Im Kanalmodell können mehrere solche Leitungsmodelle beliebiger Länge und in beliebiger Konfiguration verbunden werden.

### 3.2 Analysemethodik

Wenn sich Störpulse im Bordnetz mit dem modulierten Signal überlagern, ist es kaum möglich, anhand des Gesamtsignals die Störung für die Kommunikation zu beurteilen (**Bild 5**, links). Für die eigentliche Bitdetektion spielt der Aufbau des Receivers eine wichtige Rolle, weil das Eingangssignal dort gefiltert und demoduliert wird.

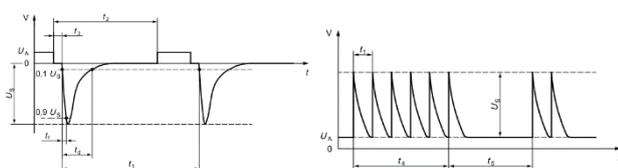


**Bild 5** Moduliertes Signal mit Störpuls (links) und Einfluss des Störpulses im Augendiagramm (rechts)

Erst nach der Demodulation kann das Signal auf Integrität analysiert werden. Die Analysemethodik in diesem Beitrag verwendet die vorgestellten Demodulationsverfahren. Mit einem Augendiagramm (**Bild 5**, rechts) kann dann näherungsweise definiert werden, in welchem Bereich eine störungsfreie Kommunikation sichergestellt werden kann.

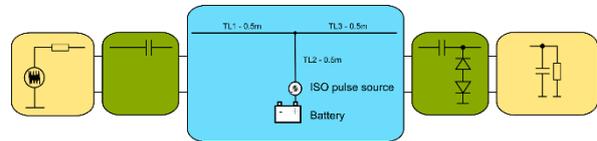
## 4 Analyse der Störfestigkeit gegen ISO Pulse

Im Kfz-Energiebordnetz entstehen im Betrieb kontinuierlich Störpulse. Solche pulsformigen Störungen werden z.B. durch Abschalten von elektrischen Verbrauchern, aber auch allgemein durch schnelle Schaltereignisse allen elektrischen Verbrauchern verursacht und sind nicht deterministisch. Im internationalen Standard ISO 7637-2 sind typische Pulsformen für ein 12 V Bordnetz definiert (**Bild 3**). Die Pulse haben wegen kurzen Anstiegszeiten und hohen Amplituden einen Hochfrequenzanteil. Da sich diese Pulse über das Energienetz ausbreiten, wie auch die PLC, kann es zu Datenverlust kommen.



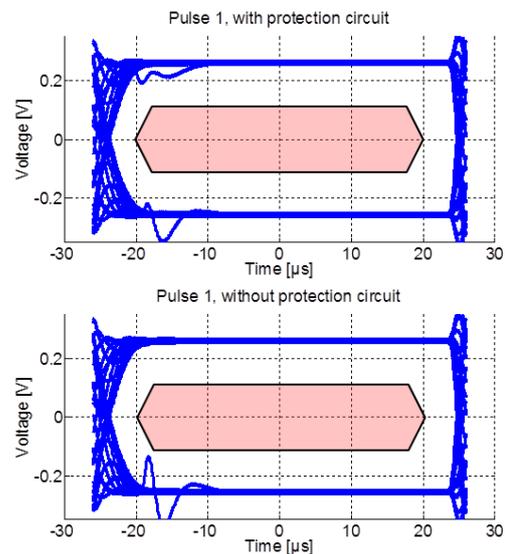
**Bild 6** Langsamer ISO Puls 1 (links) und schneller Burst ISO Puls 3a (rechts)

Zur Untersuchung der Störfestigkeit gegen die definierten Pulse aus dem ISO Standard wurde im Kanalmodell eine 12 V Batterie und eine ISO Pulsquelle über eine 0,5 m Leitung an die 1 m lange Übertragungsstrecke angeschlossen (**Bild 7**).

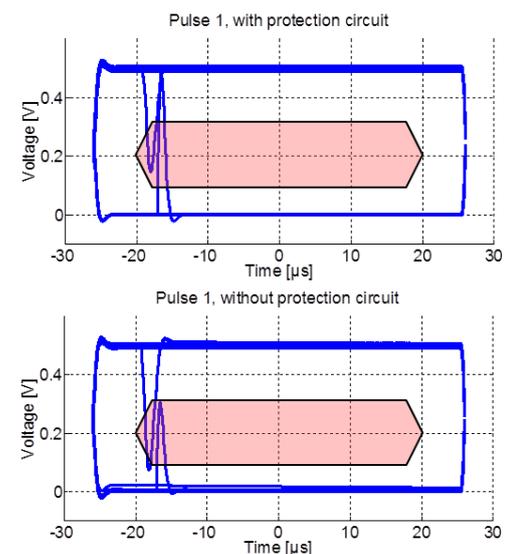


**Bild 7** Modellübersicht für ISO Pulstest

Die Simulation wird jeweils für die FSK und ASK mit und ohne Schutzdiode durchgeführt. In **Bild 8 & 9** sind die Simulationsergebnisse für den ISO Puls 1 abgebildet. Es handelt sich um einen relativ langsamen Puls mit einer Anstiegszeit von 1 µs.



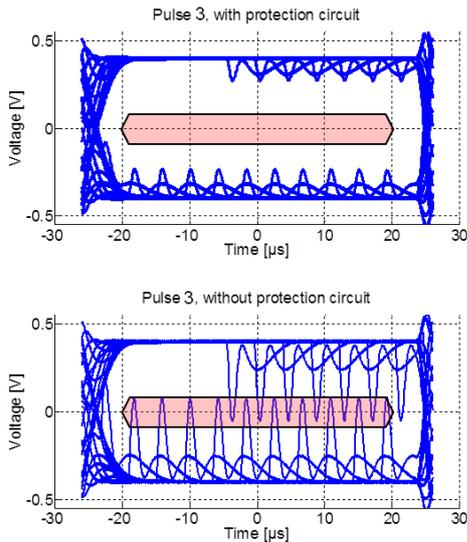
**Bild 8** Augendiagramm für ISO Puls 1, FSK



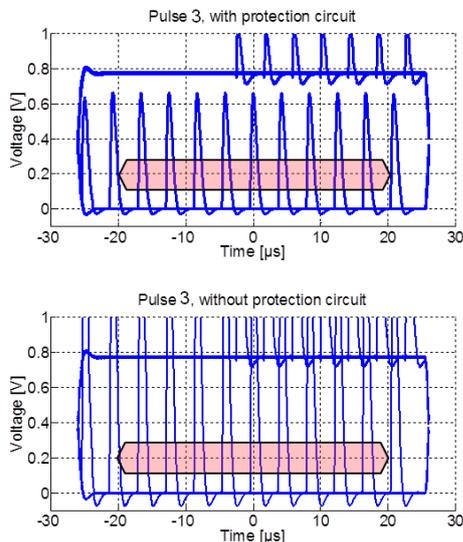
**Bild 9** Augendiagramm für ISO Puls 1, ASK

Im demodulierten Signal ist die Pulsstörung deutlich zu erkennen. Wegen der größeren Bandbreite des Eingangsfilters bei dem ASK Receivermodell wirkt sich die Pulsstörung stark auf das Signal aus und kann zum Ausfall der Kommunikation bzw. zu Datenverlust führen. Die FSK hat zwei schmalbandige Eingangsfiler und ist dementsprechend störstester gegenüber dem ISO Puls 1. Die Schutzdioden zeigt in diesem Fall kaum Einfluss auf die Signalintegrität.

Die Simulationsergebnisse der Untersuchung für Burst Pulse mit Anstiegszeiten im Bereich von einigen ns (ISO Puls 3) sind in **Bild 10 & 11** zu sehen.



**Bild 10** Augendiagramm für ISO Puls 3, FSK



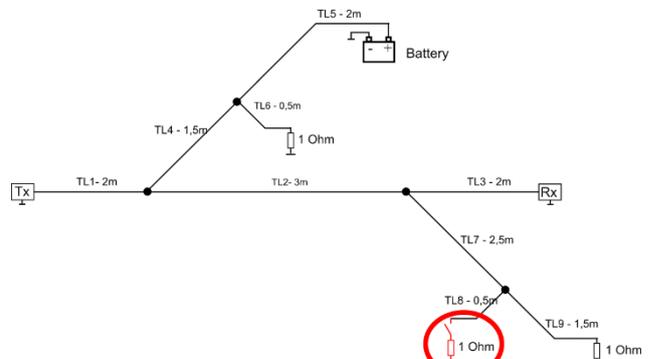
**Bild 11** Augendiagramm für ISO Puls 3, ASK

Für beide Receivermodelle sind die Störpulse ohne Schutzdiode im demodulierten Signal sehr ausgeprägt. Mit der Schutzdiode zeigt sich bei dem FSK Receivermodell eine deutliche Verbesserung der Signalintegrität. Auch bei der ASK sind die Pulse gedämpft, jedoch ist eine eindeutige Bitdetektion nicht mehr gewährleistet. Auch hier ist wieder das breitbandige Eingangsfiler für die geringere Dämpfung verantwortlich.

Aus diesen Untersuchungen lässt sich eine minimale Augenöffnung zur störungsfreien Biterkennung für die verwendeten Modelle und angewendeten ISO Pulsen ableiten. Hier wurde eine Öffnung von 200 mV festgelegt. Für langsame Pulse ist das FSK Receivermodell auch ohne Schutzdioden störstest. Für Burst Pulse zeigt sich nur für das FSK Receivermodell mit Schutzdioden robustes Verhalten

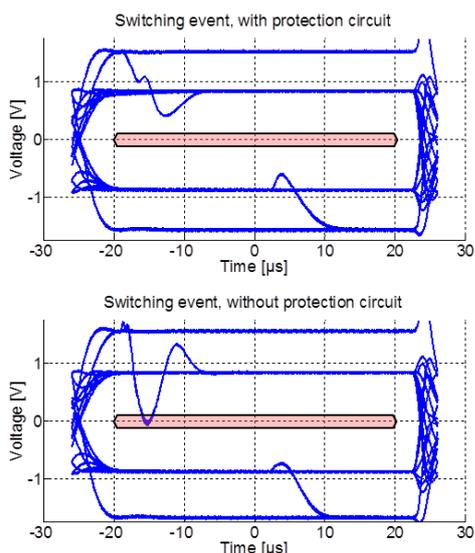
## 5 Schaltereignis in einem verzweigten Kabelbaum

Zur Untersuchung der Störfestigkeit bei Schaltereignissen in der Nachbildung eines ausgedehnten und verzweigten Energiebordnetzes wird die Konfiguration in **Bild 12** simuliert. Das Bordnetz wird mit drei 150 W Verbrauchern belastet. Das Abschalten einer Last führt wegen der Leitungsinduktivitäten zu einem hohen Spannungspuls. Hier soll untersucht werden, ob die zuvor ermittelte minimale Augenöffnung für ISO Pulse auch bei Schaltereignissen in solch einer Konfiguration gültig ist.

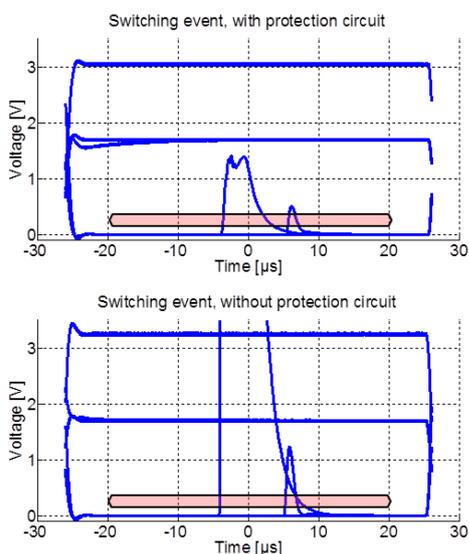


**Bild 12** Kanalmodell als verzweigter Kabelbaum mit schaltbarer Last

Die Simulationsergebnisse sind in **Bild 13 & 14** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch Abschalten einer Last die Signalintegrität im demodulierten Signal gestört wird. Auch hier ist eine eindeutige Dämpfung des Pulses und Verbesserung der Signalintegrität durch die Schutzdioden festzustellen.



**Bild 13** Simulationsergebnisse für Schaltereignis im verzweigten Kabelbaum, FSK



**Bild 14** Simulationsergebnisse für Schaltereignis im verzweigten Kabelbaum, ASK

Nur bei dem FSK Modell mit Schutzdioden gibt es keine Verletzung der Augenöffnung. Die ermittelten Grenzen für eine eindeutige Biterkennung aus dem ISO Puls-Test sind dementsprechend für die vorliegende Konfiguration gültig.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Störfestigkeit einer PLC in einem Kfz-Energiebordnetz untersucht. Zwei Modulationsverfahren (ASK und FSK) zur Übertragung von digitalen Daten wurden vorgestellt. Die notwendigen Simulationsmodelle wurden entwickelt und in VHDL-AMS realisiert. Als Testsignale dienen genormten Pulse, die in einem 12 V Kfz-Energiebordnetz auftreten können. Damit konnte der Einfluss von langsamen und schnellen ISO Pulsen auf das demodulierte Signal für die jeweiligen Receiver-Modelle untersucht werden. Auch der Einfluss eines Überspannungsschutzes am Receiver Eingang wurde

mit der vorgestellten Methodik untersucht. Für die Bewertung der Störfestigkeit wurden die Augendiagramme der demodulierten Signale betrachtet. Durch schmalbandige Filter und der Verwendung von Schutzdioden konnten bei dem FSK Modell Grenzen für eine fehlerfreie Bitdetektion definiert werden. Die aus dem simulierten ISO Puls-Test abgeleitete Augenöffnung wurde an einem komplexeren Simulationsmodell mit verzweigten Kabelbaum und einem Schaltereignis verifiziert.

Die vorgestellte Methodik kann durch das Anpassen von Receivermodellen dazu verwendet werden, das Ausfallverhalten von realen Transceivern nachzubilden. Außerdem können damit die Detektionsschwellen für die AD-Wandlung des demodulierten Signals, unter Einfluss von ISO Pulsen, ermittelt werden.

## 7 Danksagung

Die Arbeit für diesen Konferenzbeitrag wurde teilweise von der Europäischen Union (EFRE), vom Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen (MWEIMH NRW) und dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) als Teil des Projekts ZAESAR gefördert.

## 8 Literatur

- [1] Siebert, K., Günter H., Frei S., Mickisch W.: Modeling of Frequency Dependent Losses of Transmission Lines with VHDL-AMS in Time Domain, TU Dortmund, 2009
- [2] ISO 7637-2: Road vehicles - Electrical disturbances from conduction and coupling - Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only, 2011
- [3] Paul C. R.: Analysis of Multiconductor Transmission Lines, John Wiley & Sons, 2008
- [4] Yamar: SIG60 - UART over Powerline, for AC/DC Multiplex Network, Datenblatt
- [5] Schiffer, A.: Entwurf und Bewertung eines Systems zur Datenübertragung mittels der Energieversorgungsleitungen im Kraftfahrzeug, TU München, 2001