

Simulationsbasierte Analyse der Störfestigkeit von ausgedehnten CAN FD-Netzwerken gegen elektromagnetische Felder

M.Sc. Carina Austermann, Technische Universität Dortmund, Deutschland
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Deutschland

1 Einleitung

Die große Anzahl von elektrischen Komponenten und Steuergeräten im Fahrzeug erfordert Kommunikationssysteme mit vielen Teilnehmern und hohen Datenraten. CAN FD [1,2] ermöglicht Übertragungsraten bis 8 MBit/s über ein ungeschirmtes verdrehtes Leitungspaar. Die räumliche Ausdehnung der Kommunikationsnetzwerke und die Zunahme leistungselektronischer Systeme im Fahrzeug bilden eine herausfordernde elektromagnetische Umgebung. Teile des Kommunikationsnetzes können sich nah an Störquellen befinden, was eine Einkopplung von Störgrößen ermöglicht. Für die Realisierung von neuen Fahrzeugfunktionen bis hin zu automatisiertem Fahren ist eine schnelle und zuverlässige Datenübertragung unerlässlich und damit auch die genaue Kenntnis über die Störfestigkeit der Kommunikationssysteme. In diesem Beitrag wird eine simulationsbasierte Analyse von ausgedehnten CAN FD-Netzwerken mit mehr als 3 Teilnehmern vorgestellt, die eine quantitative Bewertung der Störfestigkeit verschiedener Netzwerktopologien ermöglicht. Es wird ein modular aufgebautes Simulationssetup präsentiert, das für eine systematische Analyse von Parametern der Netzwerktopologie und der Störeinkopplung verwendet wird. Als Störquelle wird eine ebene Welle betrachtet, sodass die Analyse verschiedener Frequenzen der eingekoppelten Felder möglich ist. Die Verwendung von ungeschirmten verdrehten Leitungen führt vor allem zur Einkopplung von Common-Mode-Störungen (CM). Da in einem differentiell übertragenden Kommunikationssystem Differential-Mode-Störungen (DM) besonders kritisch sind, wird ebenfalls die durch Asymmetrien im Netzwerk hervorgerufene Modenkonzersion und die damit entstehenden DM-Störungen untersucht. Das Paper ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 werden die Simulationsmodelle für Kommunikationstransceiver, Leitungen und Störeinkopplung einer ebenen Welle vorgestellt. In Kapitel 3 werden auf Basis der Modelle verschiedene Netzwerktopologien aufgebaut und mit Frequenz- und Zeitbereichssimulationen untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Methodik der simulationsbasierten Analyse der Netzwerktopologien. Die CM- und DM-Spannungen an den verschiedenen Transceivern im Netzwerk können für die Bewertung der Störfestigkeit verwendet werden, sodass kritische Parameter der untersuchten Stern- und Ringtopologien identifiziert werden können. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 zusammengefasst.

2 Simulationsmodelle

Die Untersuchungen und Analysen in diesem Beitrag werden mit LTspice durchgeführt. Die Modelle für das Kommunikationssystem, Leitungen und die Störeinkopplung durch eine ebene Welle werden in diesem Kapitel beschrieben.

2.1 Transceiver und Terminierungsnetzwerk

In Bild 1 (a) ist das Transceivermodell inklusive Terminierungsnetzwerk dargestellt. Das Modell wurde aus den u.a. in [3] und [4] vorgestellten und mit Messungen validierten Simulationsansätzen entwickelt. Die CAN FD-Signale werden mit MOS-Transistormodellen erzeugt, die mit den Spannungsquellen $v_{c,1}(t)$ und $v_{c,2}(t)$ angesteuert werden, sodass eine sehr genaue Anpassung an gemessene Spannungsverläufe möglich ist. Die Empfangsfunktion des Transceivers wird mit einem Schmitt-Trigger und einem ohmschen Widerstand modelliert, an dem das RxD-Signal anliegt. Das Terminierungsnetzwerk der CAN FD-Teilnehmer besteht aus einer 51 μH Gleichtaktrossel (engl. Common Mode Choke, CMC) und einer T-Terminierung aus zwei ohmschen Widerständen R_T und einem 4,7 nF Kondensator. Das Ersatzschaltbild zur Modellierung der CMC ist in Bild 1

(b) dargestellt. Als Referenz für die Gleichtaktrossel wird die ACT45B von TDK [5] verwendet. Die Verifikation des CMC-Modells erfolgt durch den Vergleich von Common- und Differential-Mode-Impedanzen, die durch Messung und Simulation bestimmt wurden. Die Ergebnisse des Vergleichs können Bild 1 (c) entnommen werden und zeigen eine gute Übereinstimmung.

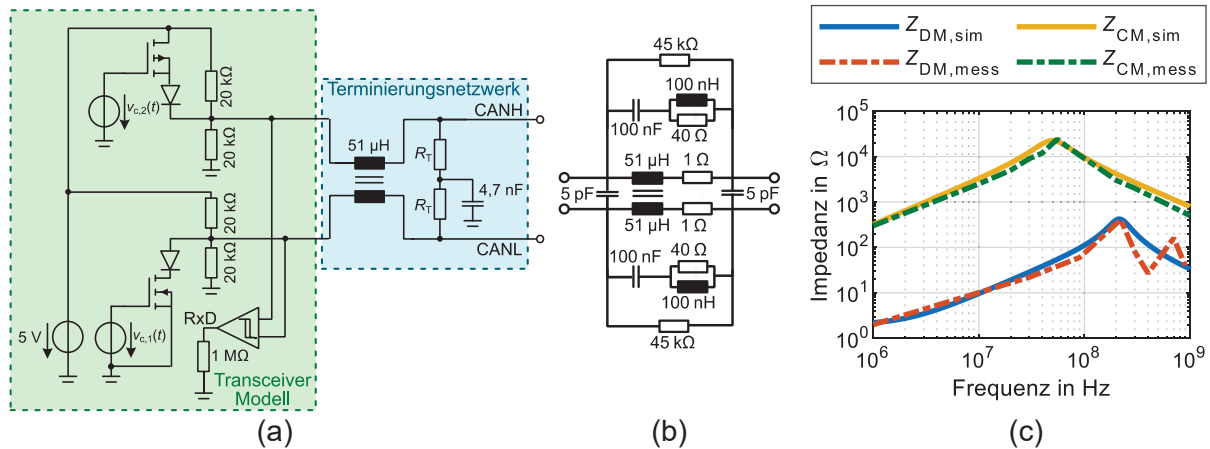


Bild 1: Modellierungsansatz CAN FD-Transceiver und Terminierungsnetzwerk (a), Ersatzschaltbild CMC (b) und Impedanzen des CMC-Modells (c)

2.2 Leitungsmodelle

Der Aufbau verschiedener Netzwerktopologien erfordert Leitungsmodelle der ungeschirmten verdrillten Leitung. Die untersuchte Störquelle ist die Einkopplung einer ebenen Welle in eine ungeschirmte Leitung. Das dazu verwendete Leitungsmodell wird ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt.

2.2.1 Ungeschirmtes verdrilltes Leitungspaar

Als Verkabelung wird für CAN FD üblicherweise ein ungeschirmtes verdrilltes Leitungspaar (TWP) verwendet. Um die Nähe der Kommunikationsleitungen im Fahrzeug zur Karosserie abzubilden wird im Modell eine Massefläche verwendet. Der Querschnitt der Leitung und die verwendeten Geometrieparameter sind in Bild 2 dargestellt. Die LTspice-Modelle basierend auf der Leitungstheorie werden mit dem Softwaretool SACAMOS [6] mittels der Geometrieparametern erstellt. In diesem Modellierungsansatz wird ein ideal symmetrisches Leitungspaar angenommen, sodass keine Modenkonzersion durch das TWP verursacht wird. Die Leitungslängen variieren in den untersuchten Topologien und werden in der Beschreibung der jeweiligen Simulation definiert.

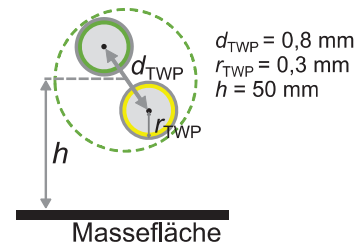


Bild 2: Geometrie zur Modellierung der Kommunikationsleitungen

2.2.2 Einkopplung einer ebenen Welle in eine ungeschirmte Leitung

Das Simulationsmodell der Einkopplung einer ebenen Welle in eine Leitung wird ebenfalls mit dem Softwaretool SACAMOS erstellt. Dieser Modellierungsansatz wird vor der Verwendung in den weiterführenden Untersuchungen mit Simulationsergebnissen des Feldsimulationstools CONCEPT [7] verglichen. Das Feldsimulationstool basiert auf der Momentenmethode zur Lösung der Feldintegralgleichungen. Als Vergleichssetup wird eine einfache Leitung mit Radius $r_{SW} = 0,3 \text{ mm}$ und Länge 2 m in einer Höhe von 50 mm über einer idealen Massefläche verwendet. Die Leitung wird an beiden Enden mit Widerständen $R_1 = R_2 = 50 \Omega$ terminiert. Das verwendete Setup und das Koordinatensystem sind in Bild 3 dargestellt. Es werden in dieser Untersuchung 3 verschiedenen Orientierungen der ebenen Wellen betrachtet. Diese werden im Folgen-

den mit Fall I bis III bezeichnet und können Tabelle 1 entnommen werden. Die angegebenen Orientierungen von E- und H-Feld der ebenen Welle beziehen sich auf das in Bild 3 dargestellte Koordinatensystem.

Fall	Orientierung E-Feld	Orientierung H-Feld
I	z	y
II	z	x
III	x	y

Tabelle 1: Untersuchte Orientierungen der ebenen Welle (Koordinatensystem entsprechend Bild 3)

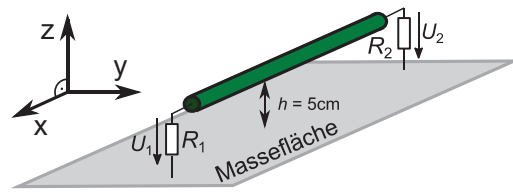


Bild 3: Leitungssetup ($l = 2 \text{ m}$, $R_1 = R_2 = 50 \Omega$) für den Vergleich der Simulationstools

Die vergleichenden Simulationsergebnisse der Spannungen über den Abschlusswiderständen ($E = 100 \text{ V/m}$) sind in Bild 4 dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Modellierungsansätze zeigen weitestgehend eine gute Übereinstimmung. Es sind akzeptable Unterschiede in den erreichten Amplituden zu erkennen, die auf den nicht modellierten Abstrahleffekten in der Leitungstheorie beruhen. Es sind bereits signifikante Unterschiede in Spektrum und maximaler Amplitude durch die verschiedenen Orientierungen der ebenen Welle zu erkennen. Dies wird in den Untersuchungen der CAN FD-Netzwerke weiterführend betrachtet.

Im Folgenden wird eine Einkopplung in ein ungeschirmte verdrehte Leitung untersucht. Die in Bild 2 vorgestellten Geometrieparameter werden ebenfalls für das Leitungsmodell mit Störeinkopplung verwendet. Dieser Modellierungsansatz basiert auf der Annahme eines ideal verdrehten Leitungspaares, sodass ausschließlich Common-Mode-Störgrößen in die Leitung einkoppeln.

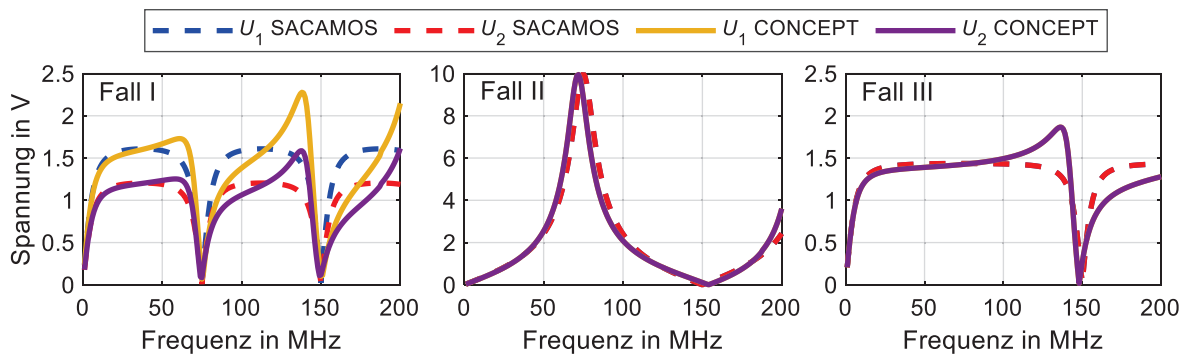


Bild 4: Vergleich der Simulationstools für verschiedene Orientierungen der Einkopplung einer ebenen Welle in eine einfache ungeschirmte Leitung ($E = 100 \text{ V/m}$, $l = 2 \text{ m}$, $R_1 = R_2 = 50 \Omega$)

3 Simulative Untersuchung von CAN FD-Netzwerktopologien

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse für verschiedene Netzwerktopologien vorgestellt und der Einfluss von Netzwerkparametern auf die Störfestigkeit der Kommunikation wird herausgearbeitet. Zu Beginn wird eine symmetrische Sterntopologie analysiert. Im Anschluss daran werden Sterntopologien mit unterschiedlich langen Leitungen zu den Transceivern betrachtet. In allen Untersuchungen wird zunächst die Common-Mode-Spannung am Eingang der Transceiver $U_{CM,IC} = (U_{CANH,IC} + U_{CANL,IC})/2$ (vgl. Bild 1) dargestellt und analysiert. Da in einem differentiellen Übertragungssystem die DM-Störungen deutlich kritischer sind, wird abschließend die durch Asymmetrien im Netzwerk hervorgerufene Konversion von Common Mode zu Differential Mode mit Simulationen untersucht.

3.1 Analyse symmetrischer Sterntopologien

Zunächst wird die im rechten Teil von Bild 5 dargestellte Sterntopologie analysiert. Die Teilnehmer N_1 und N_2 werden wellenwiderstandsrichtig (120Ω bzw. $R_T = 60 \Omega$) und alle weiteren Teilnehmer N_3 bis N_m hochohmig terminiert. Die hochohmige Terminierung erfolgt mit den Widerständen

$R_T = 1,3 \text{ k}\Omega$. Es werden zunächst symmetrische Netzwerke betrachtet, bei denen alle Leitungslängen l_1 bis l_m identisch sind. Bevor der Einfluss der Netzwerkparameter betrachtet wird, werden verschiedene Ausbreitungsrichtungen und Polarisierungen der einkoppelnden ebenen Welle untersucht. Es werden dabei die drei Orientierungen der ebenen Welle verwendet, wie in der Beschreibung der Modellierungsansätze in Kapitel 2.2.2 (vgl. Tabelle 1). Das verwendete Koordinatensystem zur Beschreibung der Störeinkopplung in eine TWP ist im rechten Teil von Bild 5 dargestellt. Es wird zunächst angenommen, dass die Feldeinkopplung ausschließlich an einer Leitung auftritt und an allen anderen Leitungen kein externes Feld anliegt. Es wird ein symmetrisches Netzwerk mit 4 Teilnehmern analysiert, in dem alle Leitungen eine Länge von 3 m besitzen. Im linken Teil von Bild 5 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Die Symmetrie des Netzwerks führt dazu, dass ausschließlich zwei verschiedene Positionen der Störeinkopplung simuliert werden müssen, um die Störfestigkeit des Netzwerks vollständig zu analysieren. In der linken Spalte der Abbildung sind die Simulationsergebnisse zur Störeinkopplung mit $E = 200 \text{ V/m}$ an Leitung l_2 dargestellt, an der der wellenwiderstandsrichtig terminierte Teilnehmer N_2 angeschlossen ist (vgl. Bild 5 (rechts)). Die Spannungen $U_{\text{CM,IC}}$ an den beiden Teilnehmern N_1 und N_2 sind in einem ähnlichen Wertebereich und sind maximal für Fall II. Die Spannungen an den hochohmigen Teilnehmern N_3 und N_4 sind aufgrund der Symmetrie identisch, weshalb nur ein Plot dargestellt ist. Die Spannung ist für alle betrachteten Orientierungen der ebenen Welle an den hochohmigen Teilnehmern am größten. Die Störeinkopplung an Leitung l_3 mit hochohmig terminiertem Teilnehmer wurde ebenfalls simuliert und ist in der rechten Spalte dargestellt. Die CM-Spannung an den beiden niederohmigen Teilnehmern ist identisch und deutlich geringer als an den hochohmigen Teilnehmern. Die Spannungen an den beiden hochohmigen Teilnehmern N_3 und N_4 unterscheiden sich durch die Frequenzverläufe und erreichten maximalen Amplituden für die untersuchten Orientierungen der ebenen Welle. Fall II zeigt an beiden Positionen (l_2 und l_3) der Einkopplung maximale Amplituden an den hochohmigen Teilnehmern und wird daher für die Worst-Case-Ab-schätzungen in den folgenden Untersuchungen verwendet.

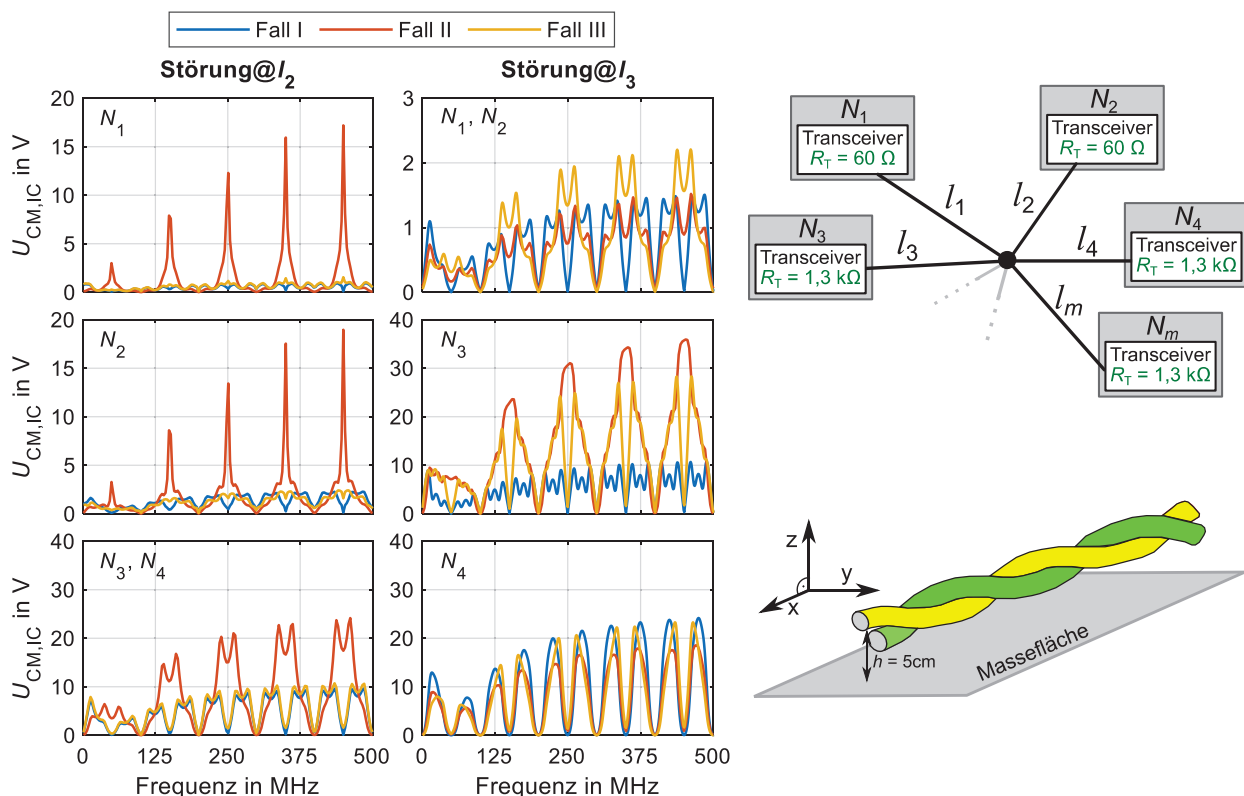


Bild 5: Simulationsergebnisse zur Einkopplung verschiedener Orientierungen der ebenen Welle in eine Sterntopologie mit 4 Teilnehmern, $l = 3 \text{ m}$ und $E = 200 \text{ V/m}$ (links); Untersuchte Netzwerktopologie und verwendetes Koordinatensystem (rechts)

Die ermittelten kritischen Frequenzen, bei denen die maximalen Amplituden erreicht werden, sind maßgeblich von der verwendeten Leitungslänge im Netzwerk abhängig. Die maximalen erreichten Spannungen am IC werden jedoch durch die Variation der Leitungslänge von 2 m bis 4 m nicht verändert. Die Auswirkung der Anzahl der Teilnehmer m wurde in verschiedenen Simulationen untersucht. Dazu wurden die Topologien im Frequenzbereich simuliert und die maximale Amplitude der CM-Spannung an den verschiedenen Teilnehmern bestimmt. In Bild 6 (a) sind die Ergebnisse für die Einkopplung mit $E = 200 \text{ V/m}$ in Leitung l_2 (vgl. Bild 5 (rechts)) dargestellt. Die maximale Spannung an den hochohmigen Teilnehmern ($N_3 \dots N_m$) sinkt mit zunehmender Anzahl an Teilnehmern. Die Symmetrie führt dazu, dass sich die Störspannung an den hochohmigen Teilnehmern aufteilt. In Bild 6 (b) sind die Ergebnisse für die Störeinkopplung an l_3 dargestellt. Die Spannung ist maximal an dem Teilnehmer an dem die ebene Welle eingekoppelt wird. Als Kriterium für eine kritische Common-Mode-Spannung wird ein Wert von 50 V angenommen. Dieser Wert ist exemplarisch gewählt und ist abhängig vom CAN FD-Transceiver und kann dem Datenblatt (z.B. [8], [9]) entnommen werden. Dieser Wert wird bei einer Einkopplung mit $E = 200 \text{ V/m}$ in eine Leitung des Netzwerks nicht erreicht. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit kann die Differenz der maximalen CM-Spannungen zu diesem Wert betrachtet werden, die sich für die verschiedenen Konfigurationen deutlich unterscheidet. Damit kann die Störfestigkeit der Netzwerke quantifiziert werden. Es lässt sich feststellen, dass bei symmetrischen Topologien eine größere Anzahl der Teilnehmer die Störfestigkeit erhöht, wenn die Störung an einem niederohmigen Teilnehmer auftritt. Die Störung an einem hochohmigen Teilnehmer ist speziell für diesen kritisch. Die Störfestigkeit ist damit maßgeblich von dem Ort der Einkopplung und der Terminierung der Transceiver abhängig.

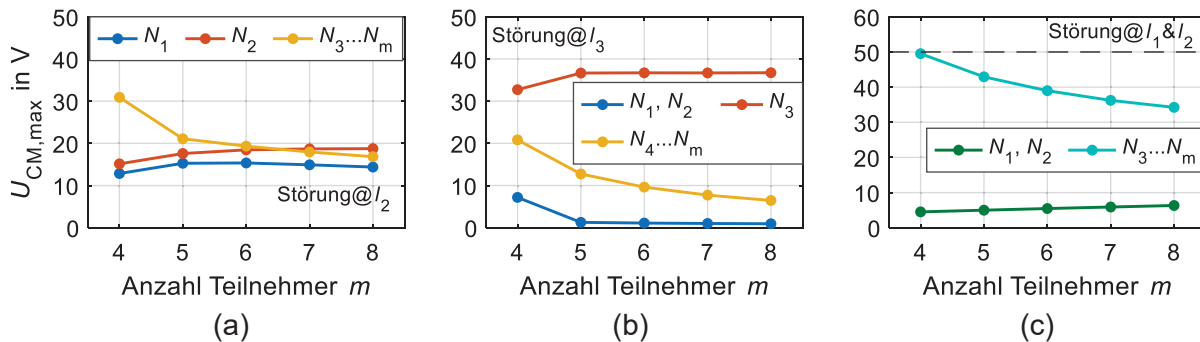


Bild 6: Simulationsergebnisse der maximalen CM-Spannungen in einem symmetrischen Netzwerk in Abhängigkeit von der Anzahl der Teilnehmer bei Feldeinkopplung in eine Leitung (a)-(b) bzw. in zwei Leitungen (c) des Netzwerks ($E = 200 \text{ V/m}$)

In einem Fahrzeug ist es möglich, dass ein Störfeld nicht nur in eine der Leitungen des Kommunikationsnetzwerk einkoppelt. Die vorgestellte Simulationsmethodik ermöglicht auch die Untersuchung der Anregung von mehreren Leitungen durch ein externes Feld. Es wird eine exemplarische Konfiguration gewählt, in der zwei Leitungen des Netzwerks parallel geführt werden. Abschnittsweise parallele Leitungen des Netzwerks im Kabelbaum sind durch die eingeschränkten Verlegewege im Fahrzeug nicht auszuschließen. In einer simulativen Untersuchung wurde eine ebene Welle ($E = 200 \text{ V/m}$) derselben Orientierung (Fall II) in l_1 und l_2 eingekoppelt. Die Ergebnisse sind in Bild 6 (c) dargestellt. Die maximalen Amplituden sind jeweils an den hochohmigen ($N_3 \dots N_m$) und wellenwiderstandsrichtigen (N_1, N_2) Teilnehmern identisch. Die Spannungen an den hochohmigen Teilnehmern sind deutlich höher und auch hier ist zu erkennen, dass die maximalen Spannungen mit zunehmender Anzahl an Teilnehmern abnehmen. In einem Netzwerk mit 4 Teilnehmern wird zudem der Wert von 50 V erreicht. Im Worst Case führt eine Feldeinkopplung an verschiedenen Positionen im Netzwerk zu einer Erhöhung der Spannungen an den Transceivern, die für einzelne Frequenzen kritische Werte annehmen können. Sind die Störfelder an verschiedenen Stellen im Fahrzeug durch Voruntersuchungen bekannt, können die Anregungen der Leitungen im Netzwerk entsprechend gewählt werden, um die Spannungen an den Transceivern simulativ zu ermitteln und eine Abschätzung des Störpotentials vorzunehmen.

3.2 Untersuchung asymmetrischer Sterntopologien

In realen Anwendungen sind asymmetrisch aufgebaute Kommunikationsnetzwerke eine typische Topologie, da die Kommunikationsleitungen entsprechend der Abmessungen im Fahrzeug gewählt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Leitungslängen in einer Sterntopologie werden im Folgenden genauer betrachtet. In der Simulation wird in einem Netzwerk aus 4 Teilnehmern die Länge einer Leitung variiert, während alle anderen Leitungen eine Länge von 4 m besitzen. Die Benennung und Terminierungen der Teilnehmer sind dem linken Teil von Bild 7 zu entnehmen. Analog zu den Untersuchungen des symmetrischen Netzwerks wird eine Ausbreitungsrichtung der ebenen Welle entsprechend Fall II verwendet (vgl. Tabelle 1). In der Simulation wird die Feldstärke E_{\max} bestimmt, die bei der Einkopplung in eine Leitung des Netzwerks zu einer CM-Spannung von 50 V an einem der Kommunikationstransceiver im Netzwerk führt. Dazu wird der Frequenzbereich von 1 bis 300 MHz ausgewertet. In einer ersten Untersuchung wird die Leitungslänge von Leitung l_1 variiert, an dem ein mit 120Ω terminierter Teilnehmer angeschlossen ist (Bild 7 (rechts)). Es zeigen sich deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Orts der Einkopplung. Die Anregung der Leitung l_3 führt unabhängig von der Asymmetrie bei einem Wert von $E \approx 320 \text{ V/m}$ zu einer kritischen CM-Spannung. Die Störeinkopplung an Leitung l_2 führt zu leitungsabhängigen Störschwellen des E-Felds. Die höchste Störfestigkeit ergibt sich für ein vollständig symmetrisches Netzwerk. Eine kürzere oder längere Leitung l_1 führt zu einer deutlichen Reduktion der Störfestigkeit. Im rechten Teil der Abbildung sind die Untersuchungsergebnisse für die Variation der Leitungslänge l_4 dargestellt. Der maximale Wert der Feldstärke bei einer Störeinkopplung in l_2 liegt wiederum bei einer Leitungslänge von 4 m, entsprechend einem symmetrischen Netzwerk. Die Störschwellen liegen jedoch höher als bei der Variation der Leitung l_1 . Bei der Variation der Leitung l_4 ist die kritische Feldstärke unabhängig von der Asymmetrie, wenn die Störung an Leitung l_3 eingekoppelt wird. Insgesamt zeigen alle untersuchten Konfigurationen eine gute Störfestigkeit, da alle Störschwellen oberhalb von $E \approx 250 \text{ V/m}$ liegen. Es sind jedoch deutliche Unterschiede in den Konfigurationen zu erkennen, die mit der vorgestellten Methodik quantifiziert werden können.

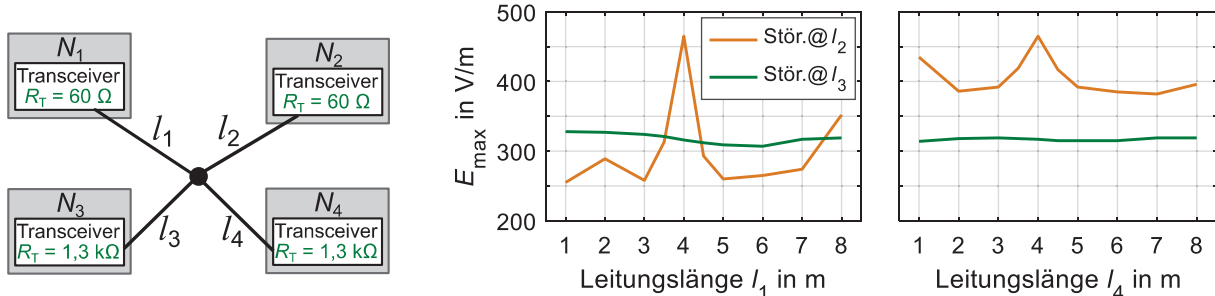


Bild 7: Untersuchte asymmetrische Sterntopologie (links); Simulationsergebnisse der Feldstärke E_{\max} die zu einer CM-Störung führt (rechts)

3.3 Untersuchung von Modenkonversion in symmetrischen Sterntopologien durch Asymmetrien in Terminierungsnetzwerken

In den bisherigen Untersuchungen wurde ausschließlich eine symmetrische Störeinkopplung und die resultierenden Common-Mode-Spannungen an den Transceivern untersucht. In realen Kommunikationsnetzwerken treten Asymmetrien in Leitungen und Terminierungsnetzwerken auf, die eine Modenkonversion ermöglichen. Der Einfluss von DM-Störspannungen durch Asymmetrien in Terminierungsnetzwerken wurde mit Messungen und Zeitbereichssimulationen für ein vereinfachtes Netzwerk bereits in [10] gezeigt. Hier werden größere Netzwerke untersucht. Mithilfe der Frequenzbereichssimulationen ist es möglich, kritischen Frequenzen zu ermitteln, die zu maximalen Störampplituden führen. Diese Frequenzen können mit einer Zeitbereichsanalyse weiterführend analysiert werden, um zu ermitteln, ob es zu Fehlern im Datensignal kommen kann. In Bild 8 ist zunächst rechts ein Terminierungsnetzwerk mit einer asymmetrischen Terminierung dargestellt.

Da die Variationen der verwendeten Komponenten und die damit entstehende Asymmetrie statistischen Schwankungen unterliegt, können hier nur grundlegende Zusammenhänge analysiert werden. Die auftretenden Asymmetrien werden durch die Variation eines Abschlusswiderstands R_T in der Terminierung modelliert. Die direkte Verbindung aller Teilnehmer über die CANH- bzw. CANL-Leitungen führt dazu, dass sich auftretende Asymmetrien im gesamten Netzwerk auswirken. Asymmetrien in Terminierungsnetzwerken und Leitungen verschiedener Teilnehmer verstärken den Effekt der Modenkonversion. Um dies nachzubilden wird in der Modellierung eine Variation, definiert durch den Parameter δ_T , in allen Kommunikationsteilnehmern angenommen.

In Bild 8 (a) sind die Simulationsergebnisse der DM-Spannung aller Knoten einer Sterntopologie mit 4 Teilnehmern dargestellt, die alle über Leitungen der Länge 3 m mit dem Sternpunkt verbunden sind. Die asymmetrischen Terminierungsnetzwerke werden mit $\delta_T = 1\%$ modelliert. Im dargestellten Spektrum zeigen sich mehrere Frequenzen, die an beiden hochohmigen Teilnehmern N_3 und N_4 zu erhöhten DM-Spannungsamplituden führen. An den mit $120\ \Omega$ terminierten Transceivern (N_1, N_2) sind die Amplituden im betrachteten Frequenzbereich deutlich geringer und es gibt keine ausgeprägten Peaks im Spektrum. Um den Einfluss von Leitungslängen und Teilnehmerzahl zu untersuchen, wurden die Spektren der DM-Spannungen an N_3 von zwei weiteren Netzwerkkonfigurationen (Bild 8 (b)) betrachtet. Der Ort der Störeinkopplung (l_3) wird nicht verändert. Es wird ein weiterer Teilnehmer dem Netzwerk hinzugefügt ($m = 5, l = 3\text{ m}$). Dadurch ändern sich die Frequenzen der Peaks nicht, aber es treten höhere Amplituden auf. In einer zweiten Variation wird eine größere Leitungslängen von $l = 4\text{ m}$ in einem Netzwerk mit 4 Teilnehmern betrachtet. Dies führt zu keiner signifikanten Änderung der Amplituden, jedoch hat die Leitungslänge einen direkten Einfluss auf die Frequenzen, bei denen die maximalen Amplituden auftreten.

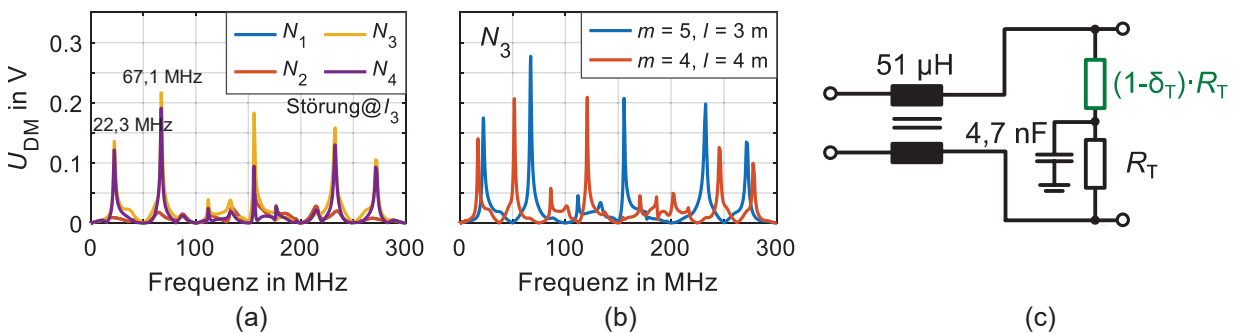


Bild 8: Simulationsergebnisse für die DM-Spannung in symmetrischer Sterntopologie $l = 3\text{ m}$, $m = 4$, $\delta_T = 1\%$ und $E = 200\text{ V/m}$ (a)-(b); Ersatzschaltbild asymmetrisches Terminierungsnetzwerk (c)

Aus der Frequenzbereichsanalyse können kritische Frequenzen identifiziert werden, die zu einer maximalen DM-Störspannung führen. Diese Ergebnisse können genutzt werden, um mit einer Zeitbereichssimulation den Einfluss auf das Kommunikationssignal zu analysieren. Eine exemplarische Simulation eines CAN FD-Datensignals ist in Bild 9 (links) dargestellt. Zur Berechnung dieser Verläufe wurde wie in

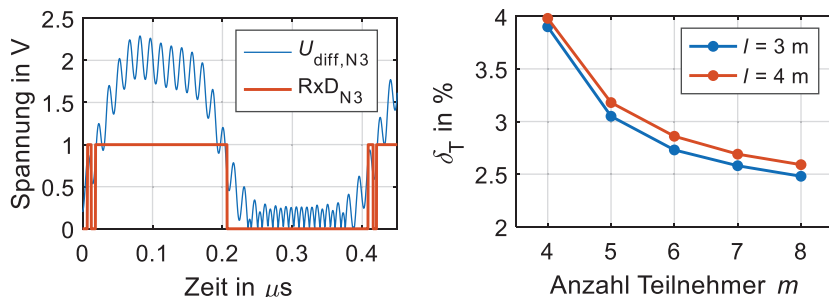


Bild 9: Simulationsergebnis Zeitbereichssignal einer aktiven Datenübertragung mit $\delta_T = 1\%$, $E = 200\text{ V/m}$ und $f_{EW} = 67,1\text{ MHz}$ (links); Kritische Asymmetrien δ_T in Abhängigkeit von der Teilnehmeranzahl ($E = 200\text{ V/m}$, $f_{EW} = 67,1\text{ MHz}$) (rechts)

$\delta_T = 1\%$ führt zu einer Überlagerung des analogen Kommunikationssignal mit einem Störsignal und im Bereich der Flanken kommt es im Datensignal RxD trotz der Hysterese des Komparators

dieser Verläufe wurde wie in den zuvor gezeigten Frequenzbereichsanalysen (vgl. Bild 8 (b)) eine Sterntopologie mit 5 Teilnehmern und Leitungen der Länge 3 m verwendet. Die Störeinkopplung erfolgt in die Leitung l_3 mit $E = 200\text{ V/m}$ und einer Frequenz von $f_{EW} = 67,1\text{ MHz}$, die zuvor aus den durchgeführten Simulationen im Frequenzbereich ermittelt wurde. Die Asymmetrie

zu mehrfacher Änderung des Pegels. Die DM-Störung ist jedoch nicht groß genug, sodass es zu einem Bitfehler kommt.

Die in [11] dargestellten Messungen zeigen, dass es bei einem DM-Störpegel von 0,85 V zu einem Bitfehler kommen kann. Die Asymmetrie in einer Sterntopologie, die zu einer solchen DM-Störspannung führt, wird in einer abschließenden Untersuchung bestimmt. Die Ergebnisse sind im rechten Teil von Bild 9 dargestellt. Die Anzahl der Teilnehmer und die Leitungslängen der Sterntopologie wurden variiert. Mit zunehmender Teilnehmerzahl und zunehmender Leitungslänge sinkt die Toleranz des Netzwerks gegenüber Asymmetrien. Die ermittelten Werte für δ_T zeigen, dass vor allem in großen Netzwerken die Modenkonzersion berücksichtigt werden sollte, da auch fehlerhaftes Verhalten der Kommunikation im Bereich der Flanken eine schnelle Datenübertragung beeinträchtigen kann. Hier wurde ein Netzwerk mit gleichen Leitungslängen verwendet. Wie im Kapitel 3.2 zuvor gezeigt, können unterschiedliche Leitungslängen die Common-Mode-Spannung an einzelnen Teilnehmern erhöhen und damit im Fall von Asymmetrien auch die Modenkonzersion und die resultierende DM-Störspannung.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Simulationsmethodik vorgestellt, mit der die Störfestigkeit von CAN FD-Netzwerken im Zeit- und Frequenzbereich untersucht werden kann. Der modulare Aufbau des Simulationssetups ermöglicht die Analyse von Netzwerken mit unterschiedlichen Leitungslängen, Terminierungsnetzwerken, Anzahl von Teilnehmern und Störeinkopplungen. Die Untersuchungen im Frequenzbereich haben gezeigt, dass die maximale Störspannung an den hochohmig terminierten Teilnehmern abfällt. Symmetrie in der Netzwerktopologie erhöht die Störfestigkeit gegenüber eingekoppelten Feldern und die Ergebnisse zeigen grundsätzlich eine hohe Störfestigkeit der Netzwerke. In einzelnen Konfigurationen kann die Störeinkopplung zu kritischen Spannungspegeln führen.

Die Kombination der Ergebnisse aus Frequenz- und Zeitbereichsanalyse ermöglicht eine umfassende Bewertung des Störpotentials für die Datenübertragung in einem CAN FD-Netzwerk. Mit der Simulation im Frequenzbereich können kritischen Frequenzen identifiziert und deren Einfluss auf das Datensignal im Zeitbereich untersucht werden. Dies wurde genutzt, um die durch Asymmetrie im Terminierungsnetzwerk verursachte Modenkonzersion in einem Netzwerk zu analysieren. Besonders kritisch sind Störeinkopplungen an hochohmigen Teilnehmern in Kombination mit großen Unterschieden in den verwendeten Leitungslängen und Asymmetrien in den Terminierungsnetzwerken. Die gezeigten Simulationsergebnisse bilden vor allem die grundlegenden Zusammenhänge der Störpotentiale in Sterntopologien ab. Eine umfassende Beurteilung aller Konfigurationen ist aufgrund der vielen Freiheitsgrade beim Aufbau eines Kommunikationsnetzwerks mit einer großen Anzahl von Teilnehmern nur mit sehr viel Aufwand möglich. Das entwickelte Simulationssetup und die gezeigte Methodik zur Bewertung von CM- und DM-Störungen bieten jedoch die Basis für detaillierte Untersuchungen spezifischer Netzwerke für verschiedene Anwendungsfälle.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts RobKom (Robuste Kommunikation in autonomen Elektrofahrzeugen) und wurde durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) unter dem Förderkennzeichen 16EMO0380 finanziell unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags liegt ausschließlich bei den Autoren.

Literaturangaben

- [1] ISO-11898, Road Vehicles - Controller Area Network (CAN), International Standards Organization, 2015
- [2] CAN with Flexible Data-Rate Specification, Version 1.0, Robert Bosch GmbH, 2011

- [3] M. Fontana, F. Canavero and R. Perraud „Integrated Circuit Modeling for Noise Susceptibility Prediction in Communication Networks,“ IEEE Trans. on Electromagn. Compat., vol. 57, no. 3, pp. 339-348, 2015
- [4] W. Prodanov, M. Valle and R. Buzas, "A Controller Area Network Bus Transceiver Behavioral Model for Network Design and Simulation," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 9, pp. 3762-3771, 2009
- [5] TDK, ACT45B type common mode filter, Verfügbar unter: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/emc/emc/cmf_cmc/catalog/cmf_automotive_signal_act45b_en.pdf (Zugriff: 25.02.2022)
- [6] C. Smart, D. Thomas, S. Greedy et al., SACAMOS: Theory Manual V1.2, University of Nottingham, 2018
- [7] H.-D. Brüns, A. Freiberg: CONCEPT-II Version 12.0 User's Manual; Institut für Theoretische Elektrotechnik
- [8] NXP Semiconductors, „TJA1441 High-speed CAN transceiver“. Rev. 2, Verfügbar unter: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1441.pdf> (Zugriff: 25.02.2022)
- [9] Infineon Technologies AG, „TLE9251V High Speed CAN Transceiver“. Rev. 1.11, Verfügbar unter: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE9251V-DataSheet-v01_11-EN.pdf?fileId=5546d4625debb399015e14b8c287597b (Zugriff: 25.02.2022)
- [10] C. Austermann und S. Frei, „Analysis on Common to Differential Mode Conversion Within Automotive Communication Systems“, IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, 2021
- [11] C. Austermann, S. Frei „Immunity of CAN, CAN FD and Automotive Ethernet 100/1000BASE-T1 to Crosstalk from Power Electronic Systems“, Transaction on Electromagnetic Compatibility, angenommen, Veröffentlichung ausstehend