

Messung und Simulation der Eigenresonanzen durch Mehrfachreflexionen in einem Leitungsnetzwerk im Frequenz- und Zeitbereich

Dr.-Ing. Mathias Magdowski, Otto-von-Guericke-Univ. Magdeburg, Deutschland
M. Sc. cand. Peter Markgraf, Otto-von-Guericke-Univ. Magdeburg, Deutschland
M. Sc. cand. Phillip Schulz, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

1 Einleitung

1.1 Eigenresonanzen in Leitungsnetzwerken

Feldbusse aus dem Automobilbereich wie CAN, EtherCAT, LIN oder FlexRay können die Busteilnehmer bzw. Steuergeräte in verschiedenen Verkabelungstopologien wie Bus, Ring, Stern oder Baum miteinander verbinden [4]. Verschiedene Topologien benötigen abweichende Kabellängen und bieten unterschiedliche Ausfallsicherheit oder Erweiterbarkeit. Auch die maximal erreichbare Übertragungsrate bzw. das EMV-Verhalten des Feldbusses wird durch die Topologie bestimmt, da eventuelle Mehrfachreflexionen durch fehlangepasste Leitungsenden und Knotenpunkte zu unerwünschten Signalüberlagerungen führen. Im Zeitbereich äußert sich das durch ein Einschwingverhalten mit gedämpften Schwingungen und entsprechenden Zeitkonstanten. Im Frequenzbereich weisen solche fehlangepassten Leitungsnetzwerke scharfe Resonanzstellen mit geringer Bandbreite und entsprechend hoher Güte auf.

1.2 Messung von Netzwerkresonanzen im Frequenz- und Zeitbereich

Zur experimentellen Untersuchung solcher Feldbusnetze bieten sich im Frequenzbereich Impedanzanalysatoren [3] an, mit denen die frequenzabhängige komplexe Eingangsimpedanz an den Leitungsenden bzw. an Knotenpunkten gemessen und auf Resonanzstellen bzw. Extremwerte des Betrags oder schnelle Phasenänderungen untersucht werden kann.

Für transiente Untersuchungen lassen sich Oszilloskope [5] nutzen, um z. B. das Einschwingverhalten bzw. die Sprungantwort nach einer Schaltflanke zu messen. Als Anregung können einfache Signalgeneratoren zur Erzeugung von Rechteckpulsfolgen bzw. Taktsignalen genutzt werden.

In diesem Beitrag werden entsprechende Messergebnisse für ein konkretes Beispielnetzwerk aus vier Leitungen sowie vier Steuergeräten (nachgebildet durch verschiedene Lastwiderstände) diskutiert und mit zugehörigen Simulationsergebnissen aus LTspice [1] verglichen. Das gewählte Netzwerk stellt dabei eine Art Worst-Case-Szenario mit besonders schlechter Anordnung der Leitungen und Steuergeräte dar, das aufgrund starker Fehlanpassungen viele Mehrfachreflexionen und hohe Resonanzgüten erwarten lässt. Die Idee, ein möglichst schlechtes Netzwerk zu untersuchen, um daraus Gestaltungsregeln für Netzwerke mit gutem EMV-Verhalten abzuleiten, entstammt dem Student Contest 2021 des German Chapters der IEEE EMC Society [2]. Das gleiche und weitere Netzwerke dieser Art werden auch im Beitrag [6] untersucht.

2 Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für ein Beispielnetzwerk

2.1 Untersuchtetes Beispielnetzwerk

Das untersuchte Beispielnetzwerk ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Es besteht aus vier Leitungen mit Längen von 2 m, 3 m, 5 m und 7 m, die durch die Aufgabenstellung in [2] vorgegeben waren. Die Leitungen verbinden vier Steuergeräte bzw. ECUs (engl. electronic control unit) miteinander, die vereinfacht als konzentrierte Abschlusswiderstände angenommen werden. Die ECUs 1 und 4 sind dabei mit einem Widerstand von $120\ \Omega$ an den Wellenwiderstand der Leitungen angepasst

und eignen sich damit für reflexionsfreie Abschlüsse an den Enden eines Busses. Die anderen ECUs 2 und 3 besitzen demgegenüber einen sehr großen Widerstand von $1\text{ M}\Omega$ und sind damit im Normalfall für Positionen entlang eines Busses vorgesehen. Werden solche ECUs an Enden eines Busses bzw. Leitungsnetzwerkes platziert, führen sie dort zu starken Reflexionen. Im gezeigten Netzwerk pendelt die durch die Quelle in ECU1 eingespeiste Energie somit immer zwischen ECU2 und ECU3 hin- und her. Die kurzgeschlossene Leitung mit 2 m Länge an ECU2 unterstützt diesen Effekt. Durch die Überlagerung hin- und rücklaufender Wellen kommt es zu einer stehenden Welle mit einem Wellenknoten an der Position der mittigen ECU4, so dass dort kaum Energie in den Anpassungswiderstand verloren geht. Dadurch hat dieses Netzwerk bei getakteter Anregung eine sehr große Einschwingzeit, wie auch in [6] nachgewiesen wurde.

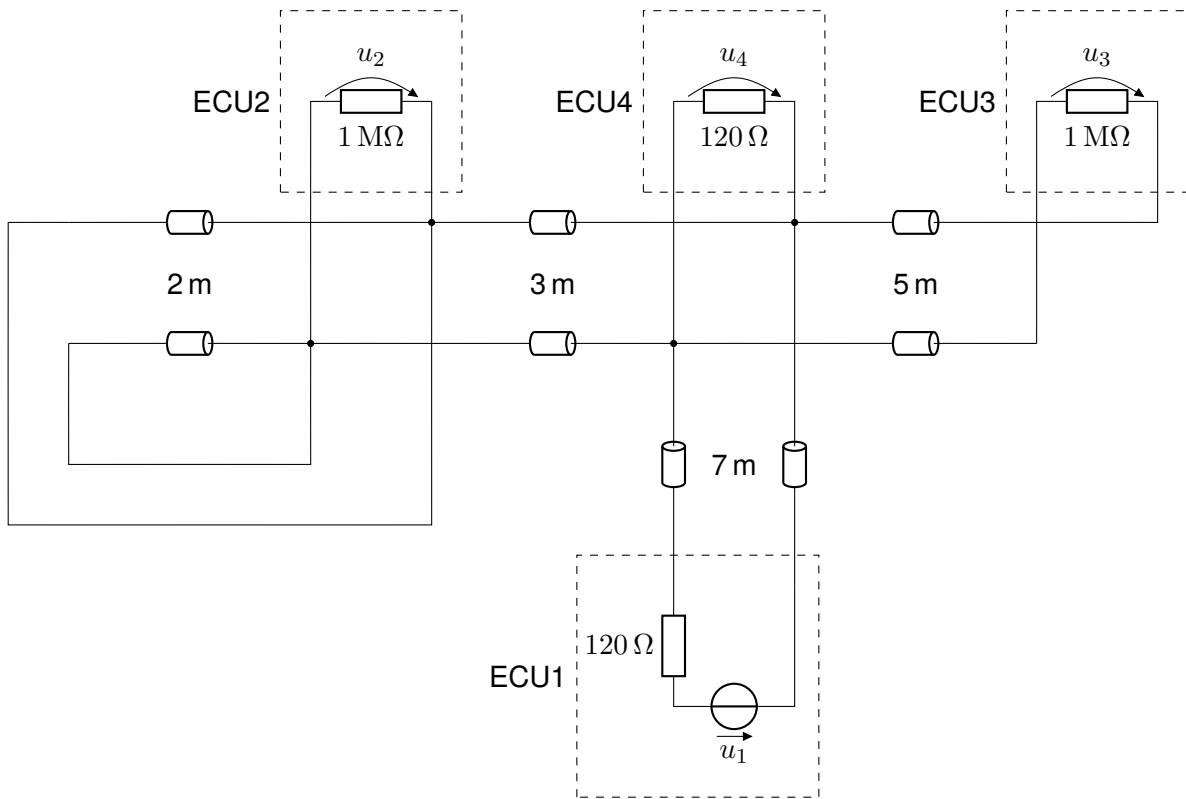


Bild 1: Schematischer Aufbau des untersuchten Worst-Case-Leitungsnetzwerkes aus vier Leitungen und vier Steuergeräten (ECUs, electronic control unit)

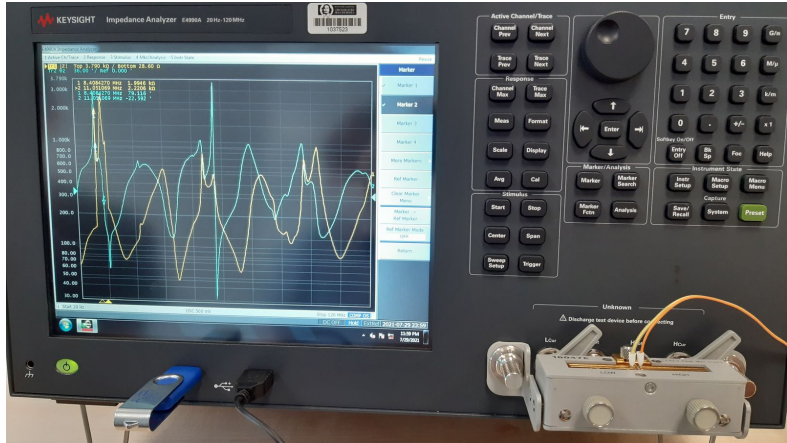
2.2 Untersuchungen im Frequenzbereich

Für die praktischen Messungen wurden zunächst entsprechende Kabel vorbereitet, siehe Bild 2a. Mit Hilfe von Kontaktklemmen wurden diese zum gewünschten Netzwerk verschaltet, siehe Bild 2c. Die entsprechenden Verbindungen sind dabei detailliert in den Bildern 2d bis 2g gezeigt. Mit einem Impedanzanalysators E4990A von Keysight, siehe Bild 2b, wurden dann die frequenzabhängigen Eingangsimpedanzen des Leitungsnetzwerkes aus Sicht der vier ECUs bestimmt. Dafür wurde der gesamte nutzbare Frequenzbereich des Impedanzanalysators von 20 Hz bis 120 MHz mit 1000 linear gestuften Frequenzschritten genutzt. Die jeweiligen Anschlüsse der untersuchten Klemmpaare des Leitungsnetzwerkes an die Messbrücke des Impedanzanalysators sind in den Bildern 2h bis 2k gezeigt.

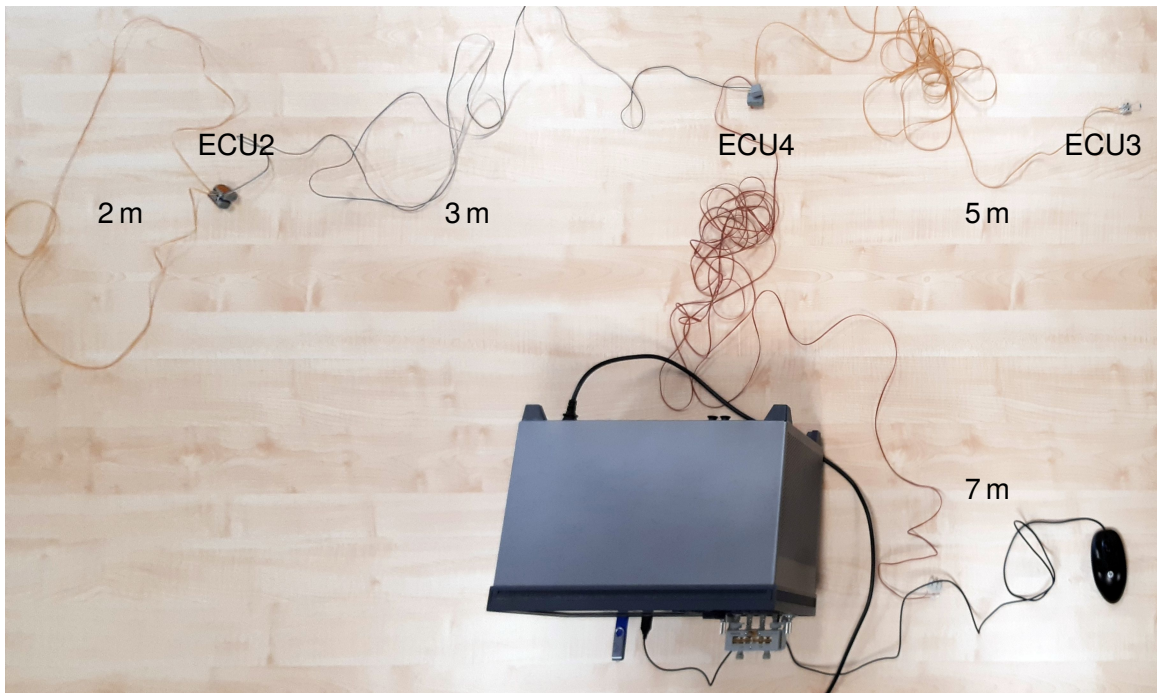
In Bild 3 sind die gemessenen Eingangsimpedanzen dargestellt und mit entsprechenden Simulationen aus LTspice [1] verglichen, für die der gleiche Frequenzbereich genutzt wurde. Die Laufzeiten der Signale entlang der Kabel wurden dabei in der Simulation geringfügig angepasst, um die Lage der simulierten Resonanzfrequenzen an die der Messungen anzugleichen.



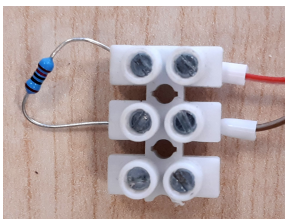
(a) verwendete Kabel



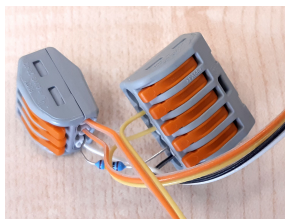
(b) Messung an der Position von ECU3



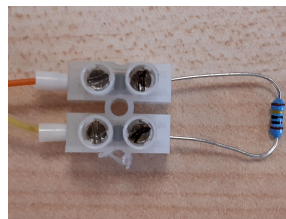
(c) gesamter Aufbau



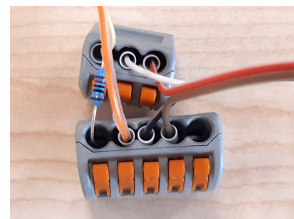
(d) Nachbildung von ECU1



(e) Nachbildung von ECU2



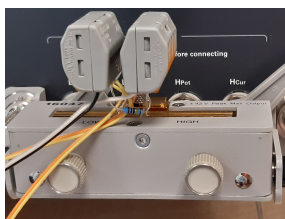
(f) Nachbildung von ECU3



(g) Nachbildung von ECU4



(h) Messung an ECU1



(i) Messung an ECU2

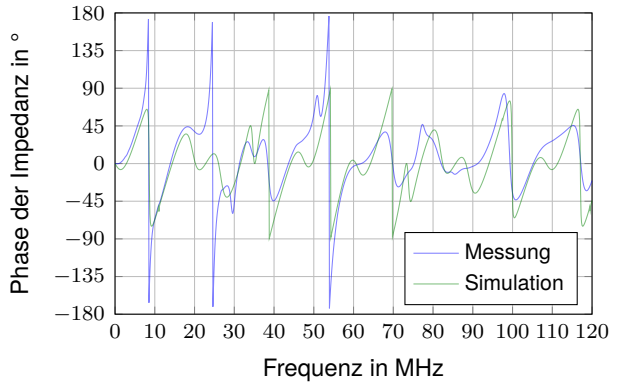
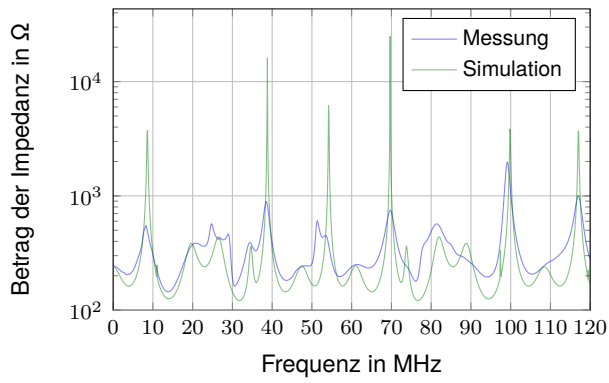


(j) Messung an ECU3

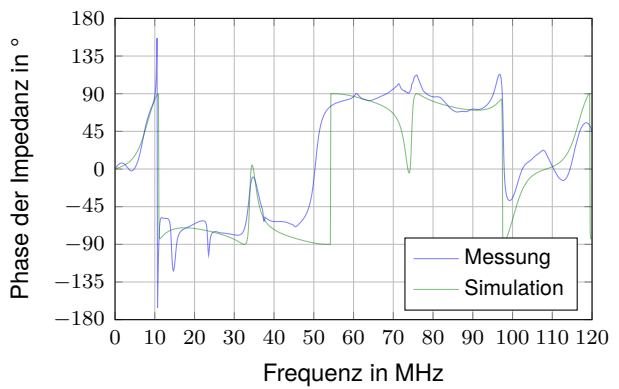
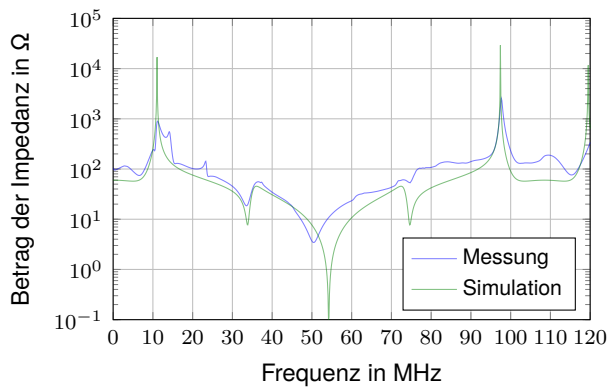


(k) Messung an ECU4

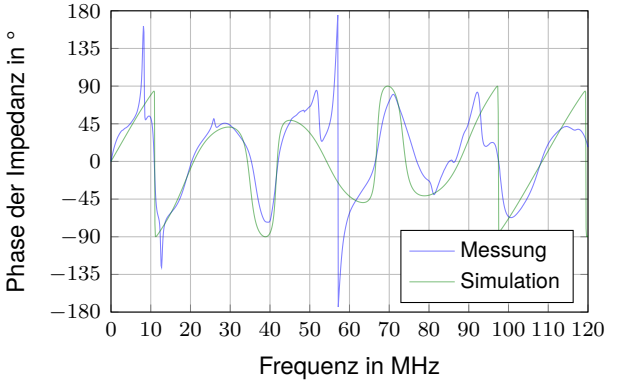
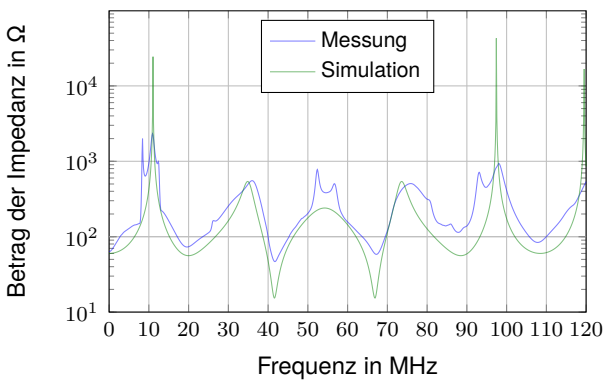
Bild 2: Messungen mit einem Impedanzanalysator im Frequenzbereich



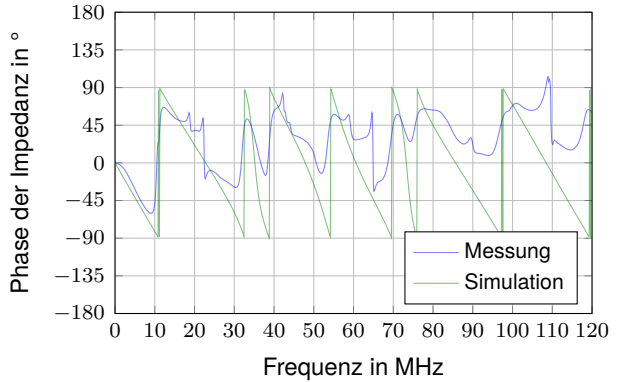
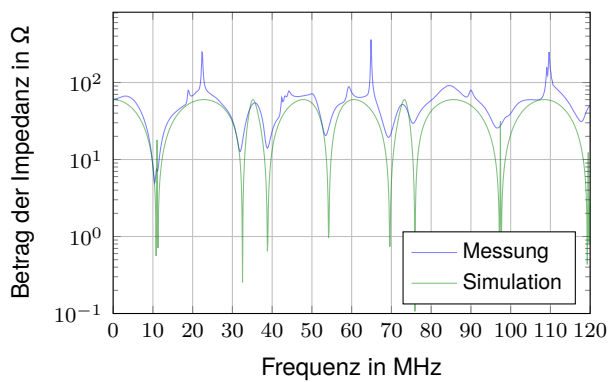
(a) an ECU1



(b) an ECU2



(c) an ECU3



(d) an ECU4

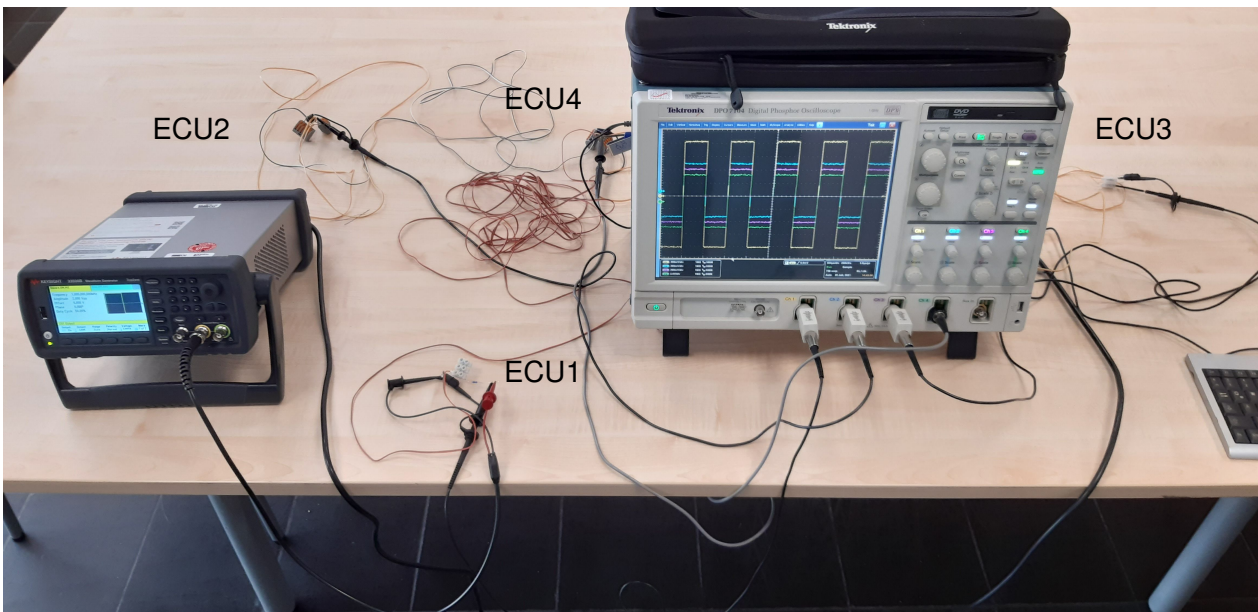
Bild 3: Frequenzabhängige Eingangsimpedanzen des Leitungsnetzwerkes an verschiedenen Messpunkten

Der Vergleich der Simulations- und Messergebnisse zeigt allgemein eine recht gute Übereinstimmung. Die simulierten Resonanzen sind meist etwas schärfer, zumindest an ECU1, ECU2 und ECU3. Ursächlich sind hier die fehlenden Verluste der Leitungen im Simulationsmodell. Nur an ECU4 treten in der Messung sehr scharfe Resonanzstellen mit großer Eingangsimpedanz auf, die in der Simulation kaum ausgeprägt sind. Auffällig ist auch, dass die frequenzabhängigen Impedanzverläufe an ECU2 und ECU3 gleiche Resonanzstellen mit besonders hoher Impedanz aufweisen, die an ECU4 genau auf eine Antiresonanz mit besonders niedriger Impedanz treffen.

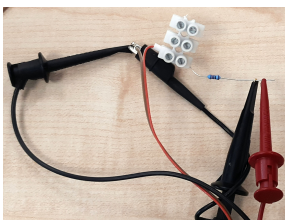
Bei der Betrachtung der Phasenwinkel der frequenzabhängigen Eingangsimpedanzen fällt auf, dass die gemessene Phase trotz sorgfältiger Kalibrierung in der Nähe der Resonanzfrequenzen auch mal den Bereich von -90° bis 90° verlässt. Der damit einhergehende negative Realteil der gemessenen Eingangsimpedanz ist nicht physikalisch und kann nur durch Messfehler bei der Messung des Phasenwinkels erklärt werden. In der Simulation treten diese Probleme jedoch nicht auf.

2.3 Untersuchungen im Zeitbereich

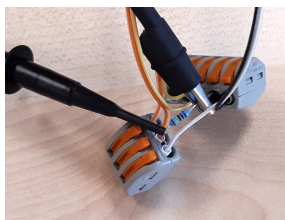
Für die Untersuchungen des transienten Einschwingverhaltens im Zeitbereich wurde das gleiche Leitungsnetzwerk genutzt. Zur Messung der Spannungen an den vier ECUs wurde ein vierkanaliges Digitalspeicheroszilloskop DPO 7104 mit einer Bandbreite von 1 GHz verwendet, siehe Bild 4a. Zur Erzeugung eines periodischen Taktsignales bzw. einer Rechteckpulsfolge mit einer Amplitude von 2 V, einer Frequenz von 1 kHz und einem Tastverhältnis von 50 % dient ein Signalgenerator der Serie 33500B von Keysight. Die Anschlüsse der Tastköpfe des Oszilloskops an die vier Messpunkte an den ECUs des Leitungsnetzwerkes sind in den Bildern 4b bis 4e gezeigt,



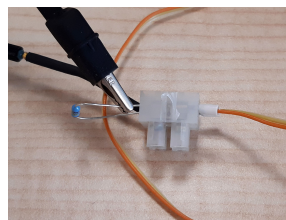
(a) gesamter Aufbau



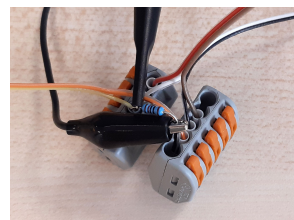
(b) Messung an ECU1



(c) Messung an ECU2



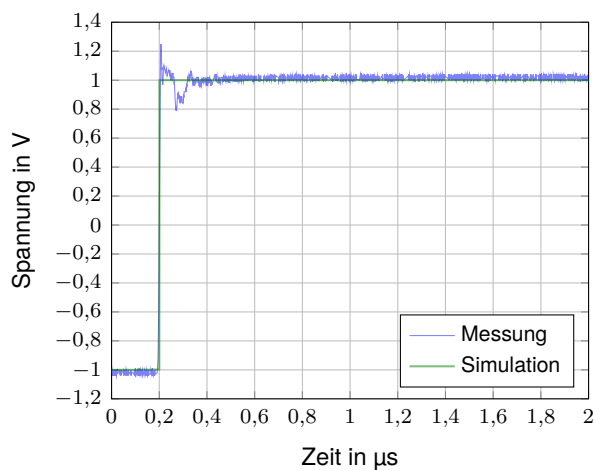
(d) Messung an ECU3



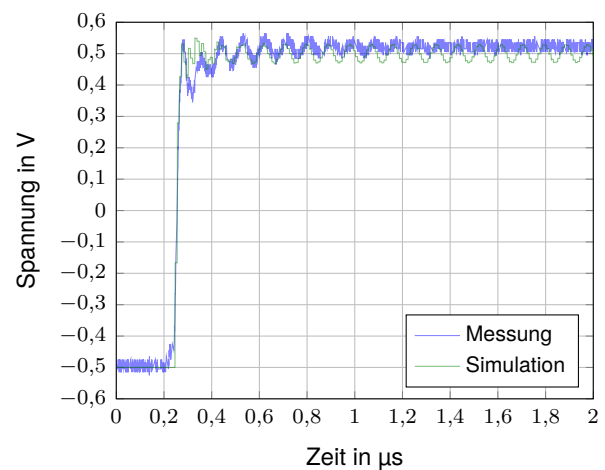
(e) Messung an ECU4

Bild 4: Messungen mit einem Digitalspeicheroszilloskop im Zeitbereich

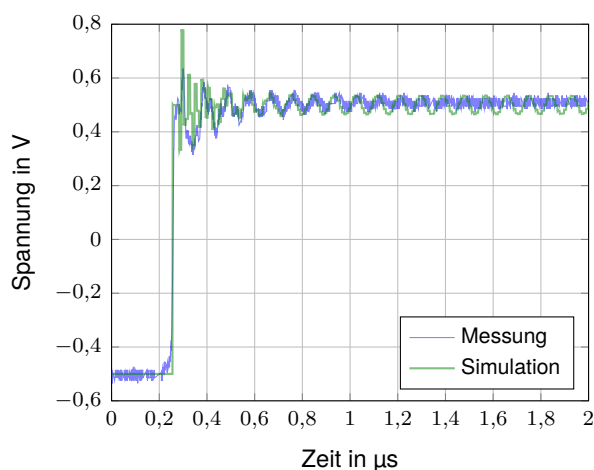
Die zugehörigen Messergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Dabei wurde die Amplitude der gemessenen Zeitverläufe geringfügig in der Skalierung angepasst, um einen besseren Vergleich mit den Simulationsergebnissen aus LTspice zu ermöglichen. Der dargestellte Zeitbereich umfasst 2 μ s, wobei der Triggerpunkt auf eine Zeit von 200ns eingestellt wurde. Schön zu erkennen ist die Verzögerung der Signale von ECU1 entlang der Leitung mit 7m Länge und einer Laufzeit von etwa 35ns zu ECU4. Von dort braucht die steigende Flanke weitere 15ns bzw. 25ns bis zu ECU2 bzw. ECU3. Wegen des 120 Ω -Widerstands an ECU4 und der beiden parallelgeschalteten Leitungen mit ihren jeweiligen Wellenwiderständen von 120 Ω erreicht die Spannung dort zunächst ein Plateau, bevor die Reflexionen von den Leitungsenden bei ECU2 und ECU3 eintreffen und die Spannung an ECU4 auf ähnliche Werte wie dort anheben. Durch die rücklaufende Welle von ECU2 zu rück zur ECU1 bricht die am Signalgenerator gemessene Spannung aufgrund seines Ausgangs- bzw. Quellwiderstandes nach etwa 70ns kurzzeitig ein, was sich dann auch auf die Messung der anderen Spannungen auswirkt, die in diesem Bereich stärker von den Simulationsergebnissen abweichen. Danach zeigen sich jedoch sowohl in der Messung als auch in der Simulation sehr ähnliche periodische Schwingungen, die aber in der Messung aufgrund der verlustbehafteten Leitungen stärker bedämpft sind und eher abklingen.



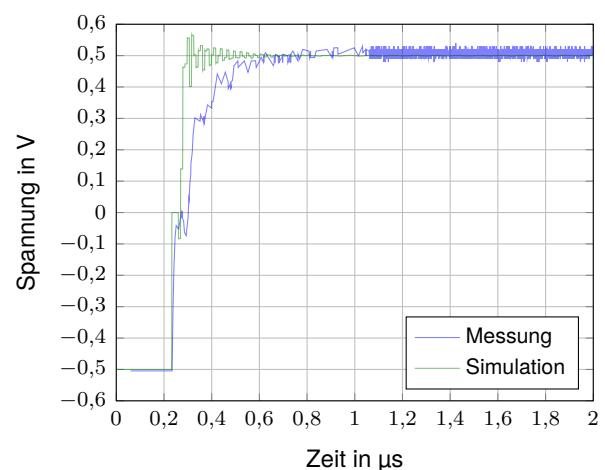
(a) an ECU1



(b) an ECU2



(c) an ECU3



(d) an ECU4

Bild 5: Sprungantworten des Leitungsnetzwerkes an verschiedenen Messpunkten

3 Zusammenfassung

Im Beitrag wurden Messergebnisse für ein stark fehlangepasstes Leitungsnetzwerk im Frequenz- und Zeitbereich vorgestellt und im Vergleich mit entsprechenden Simulationsergebnissen diskutiert. Mit solchen Messungen können zeit- und frequenzbereichsbasierte Simulationsmodelle für Leitungsnetzwerke validiert werden. Außerdem lässt sich abschätzen, welchen Einfluss die typischen Vereinfachungen in den Simulationsmodellen (z. B. verlustlose Leitungen, konzentrierte und rein ohmsche Abschlusswiderstände, frequenzunabhängige Wellenimpedanzen, dispersionsfreie Signalausbreitung, etc.) auf die Gültigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse haben. Dementsprechend sind die im Beitrag vorgestellten Ergebnisse sehr nützlich für die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen und -verfahren für die Abschätzung der erreichbaren Übertragungsrate und Signalintegrität sowie des EMV-Verhaltens in Feldbussen.

Literaturangaben

- [1] ENGELHARDT, Mike: *LTspice XVII*. Norwood, MA, USA: Analog Devices, 2019. – <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [2] GERMAN CHAPTER OF THE IEEE EMC SOCIETY: *Student Contest 2021 "Find the worst network from a signal and power integrity perspective"*. <https://site.ieee.org/germany-emc/research/student-contests/>. Version: 2021
- [3] KEYSIGHT TECHNOLOGIES (Hrsg.): *Impedance Measurement Handbook – A guide to measurement technology and techniques*. 6. Santa Clara, CA, USA: Keysight Technologies, November 2016. <https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/07/Keysight-Technologies-impedance-measurement-handbook.pdf>. – Application Note 5950-3000
- [4] LAWRENZ, Wolfhard (Hrsg.) ; OBERMÖLLER, Nils (Hrsg.): *Controller Area Network: Grundlagen, Design, Anwendungen, Testtechnik*. 5. Berlin/Offenbach : VDE-Verlag, 2011. – 484 S. – ISBN 978-3-8007-3332-3
- [5] MÜLLER, Joachim: *Digitale Oszilloskope – Der Weg zum professionellen Messen*. beam-Verlag, 2017. – 388 S. – ISBN 978-3-88976-168-2
- [6] SCHULZ, Phillip ; MARKGRAF, Peter ; MAGDOWSKI, Mathias: Simulation von stark fehlangepassten und hochresonanten Leitungsnetzwerken im Zeit- und Frequenzbereich. In: GARBE, Heyno (Hrsg.): *emv – Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*. Köln : mesago Messe Frankfurt Group, Juli 2022, S. 7