

Auswirkungen des Impedanzverhaltens eines KFZ-Kraftstoffpumpensystems auf die Störaussendung in der Komponenten Stripline Messung nach DIN EN 55025

M. Eng. Lukas Schumm, HELLA GmbH & Co. KGaA, Deutschland

1 Einleitung

Bei Anwendungen mit hohen Anforderungen an Lebensdauer und Effizienz werden Motoren häufig als bürstenlose DC Motoren (BLDC) ausgeführt. Das dreiphasige elektrische Drehfeld zur Ansteuerung der BLDC Motoren wird durch Leistungshalbleiter in B6 Brückenordnung erzeugt. Um die Verlustleistung gering zu halten, werden neben geringen ohmschen Verlusten geringe Schaltverluste durch kurze Schaltzeiten erzielt.

Die Integration von Steuergerät und Last in ein Gehäuse zur Reduzierung der elektromagnetischen Störungen wird in [1] beschrieben. Erhöhte Anforderungen an die Reduzierung der EMV-Störungen ergeben sich, wenn der Automobilhersteller einen konstruktiven Freiheitsgrad beibehält und das entsprechende Steuergerät nicht direkt am oder im Aktor platziert. Die elektromagnetischen Störungen im Fahrzeug breiten sich dann verstärkt über die Versorgungsleitungen und die Motorleitungen aus. Die Störaussendung einer Kraftstoffpumpe im Fahrzeug wird in [2] beschrieben. Um den hohen Anforderungen auch bei verwendeten Leitungslängen $>1\text{m}$ gerecht zu werden, kommen häufig geschirmte Motorleitungen zum Einsatz. Der Einfluss der Schirmung auf Motorleitung und Batterieleitung wird in [3] behandelt.

Die Einhaltung der elektromagnetischen Anforderungen des Gesamtsystems aus Steuergerät, Zuleitung und Aktor obliegt dem Steuergerätehersteller und stellt eine hohe Herausforderung dar. Im Frühstadium der Entwicklung bleibt oft nicht die Zeit, die Auswirkungen des Gesamtsystems auf die EMV ausreichend zu analysieren.

Für die Ansteuerung des Motors wird eine Schaltfrequenz von 16kHz gewählt. Die BLDC Kraftstoffpumpe wird über sechs Stufen angesteuert, wobei immer zwei Gegentaktstufen stromführend sind.

Die folgende Ausarbeitung gibt einen Überblick über die Bestimmung des Impedanzverhaltens eines Kraftstoffpumpensystems und die Auswirkungen auf die Störaussendung mittels Stripline Messung unter Berücksichtigung der DIN EN 55025 [4]. Die Entstehung und die Ausbreitung der Störungen sowie die Transferierung der Erkenntnisse auf das Fahrzeug werden diskutiert.

2 Anforderungsanalyse

Aus den Anforderungen des OEM kann der benötigte EMV Testaufbau extrahiert werden. Bild 1 zeigt den Aufbau des Kraftstoffpumpen Gesamtsystems in der Stripline Umgebung. Der Prüfaufbau für die Stripline Messung ist in der DIN EN 55025 beschrieben. Weil abweichend von der Leitungslänge nach DIN EN 55025 üblicherweise auch eine Leitungslänge von 1500mm parallel zum Septum verwendet werden darf (Abmessung $A + B1$), ergibt sich eine gesamte Leitungslänge für die Motorleitung (FLR9Y) von 2400mm (Abmessung $A+B1+B2+B3+C$). Typischerweise können die Hersteller von Motorleitungen

fertigungsbedingt ungeschirmte Leitungslängen zum Steuergerät Steckerkorb von 50mm (Abmessung A) umsetzen.

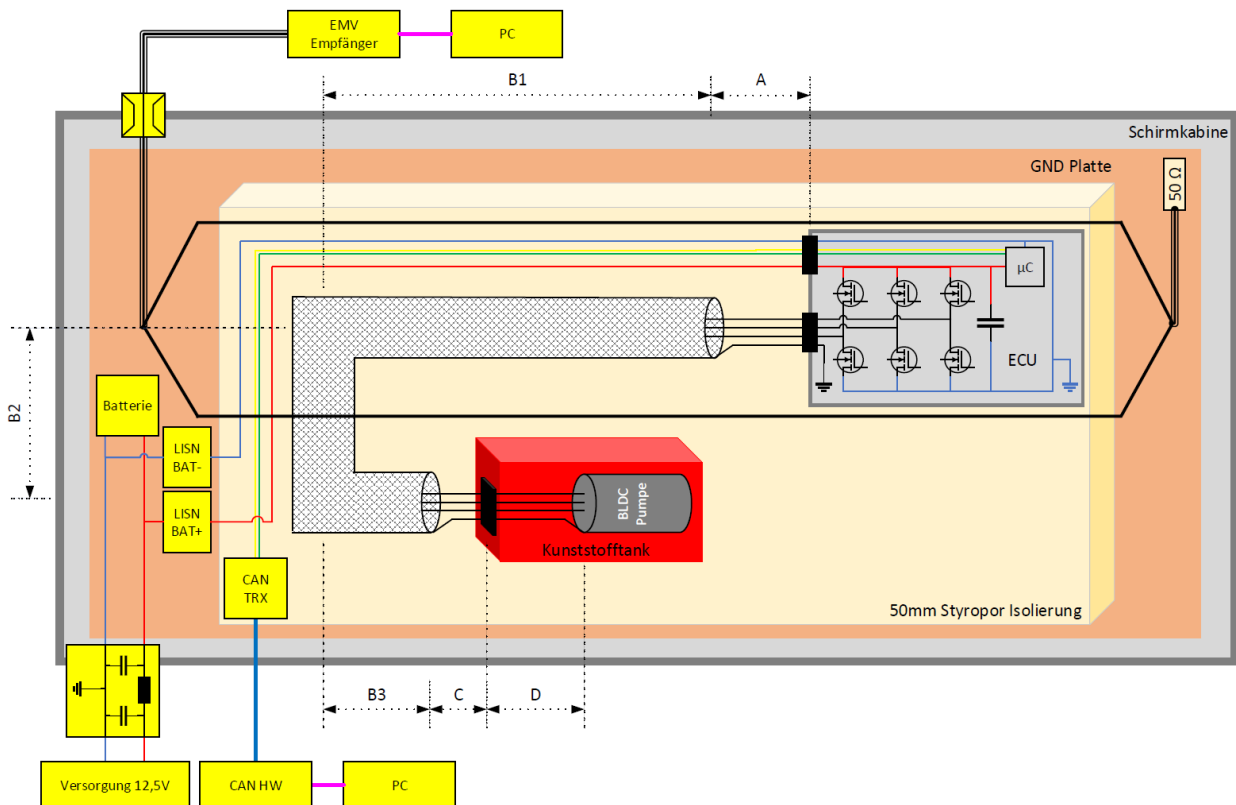


Bild 1: Abmessungen EMV Messaufbau in der Stripline Umgebung

Zum Steckerkorb des Kraftstofftanks sind es ebenfalls 50mm (Abmessung C). Die restlichen 2250mm (Abmessung $B1+B2+B3$) Motorleitung werden durch das Drahtgeflecht geschirmt. Im Kraftstofftank beträgt die Länge der mitgeführten Schirmleitung und der Motorleitung 190mm (Abmessung D).

3 Elektrische Charakterisierung

Um das Impedanzverhalten des Gesamtsystems besser verstehen zu können werden die Motorleitung und die Kraftstoffpumpe mit Anschlussleitung zunächst getrennt betrachtet. Es wird erwartet, dass Störströme durch Gleichtaktsignale in den Phasen angeregt werden. Die Störströme fließen über den Leitungsschirm zurück zum Steuergerät. Eine Impedanzmessung zwischen einer Phase und dem Leitungsschirm (entspricht der Rückführung des Gehäuseanschlusses der Kraftstoffpumpe) soll Aufschluss über die Störstromcharakteristik geben.

3.1 Ersatzschaltbild Kraftstoffpumpe mit Zuleitung

Üblicherweise ist die Kraftstoffpumpe im Fahrzeug Bestandteil eines Fördertopfes aus Kunststoff. Die Leitungslänge zwischen Kraftstoffpumpe und Fördertopfgehäuse wird aus Abschnitt 2 übernommen (siehe Abmessung D, Bild 1). Die drei Phasen und die Schirmleitung werden in dem Bereich parallel geführt. In [5] werden geschirmte und ungeschirmte Energiekabel modelliert und in Spice simuliert. Empfohlen werden 32 Zellen pro Meter für das Übertragungsnetzwerk, um eine hinreichende Genauigkeit von 1,5% zu

erzielen. Bei 19cm Zuleitung werden 6 Zellen benötigt. Für die Simulation der Kraftstoffpumpe mit Zuleitung werden neben der Kapazität zwischen Phase und Pumpengehäuse $C_{\text{Phase-Gehaeuse}}$ für jede Zelle die Kapazität zwischen Phase und Schirm C , die Leitungsinduktivität L , der Kupferwiderstand R und der Leitwert G benötigt (Bild 2).

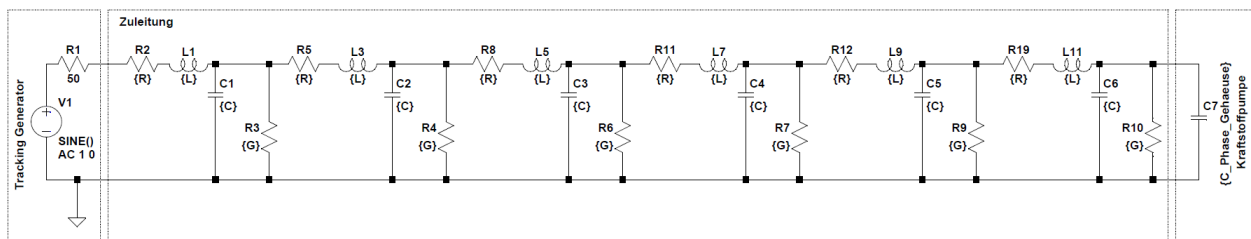


Bild 2: Ersatzschaltbild zur simulatorischen Bestimmung des Impedanzverhaltens einer Kraftstoffpumpe mit Schirmleitung [5]

3.2 Impedanzverhalten Kraftstoffpumpe

Das Simulationsmodell soll mit dem realen System verglichen werden. Eine Impedanzmessung gemäß Aufbau (Bild 3) durchzuführen, bietet sich an. Die Gegenüberstellung von Simulation und Messung ist in Bild 4 dargestellt.

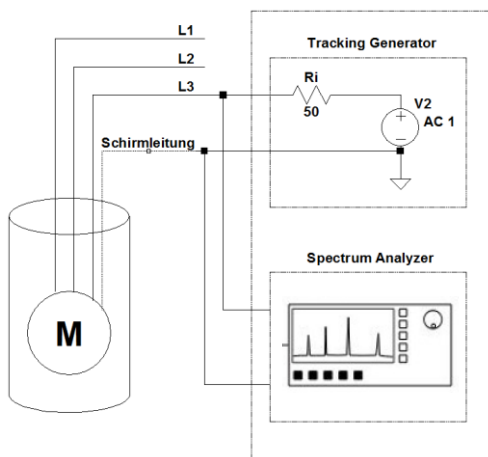


Bild 3: Tracking Generator und Spectrum Analyzer zur messtechnischen Erfassung des Impedanzverlaufs

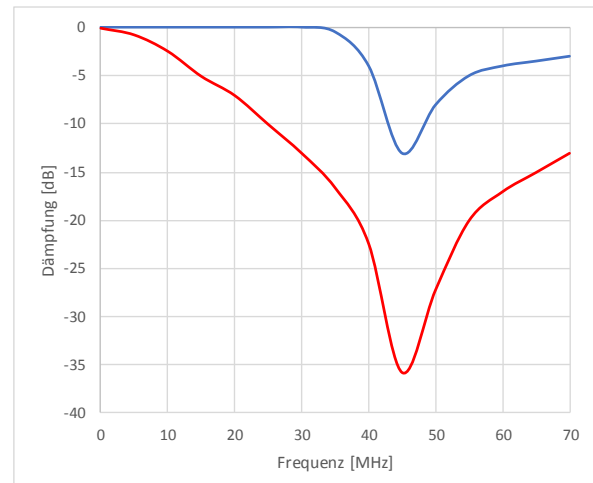


Bild 4: Simulierter (rot) und gemessener (blau) Impedanzverlauf der Kraftstoffpumpe mit Schirmleitung

Beide Verläufe haben ihre Resonanzfrequenz bei 43MHz. Die Dämpfung variiert im Vergleich zwischen Simulation und Messung um bis zu 20dB.

3.3 Ersatzschaltbild geschirmte Motorleitung

Das Modell aus der Literatur [5] wird auf die geschirmte Motorleitung übertragen (Bild 5). Die Impedanz Z_l stellt die Leitungsinduktivität und den Kupferwiderstand dar. Z_i wird genutzt um die Kapazität und den Leitwert (dielektrische Verluste) zu modellieren. Mit Z_b werden die Kapazität und der Leitwert von jeder Phase zum Schirm modelliert. Der Kopplungskoeffizient wird durch K dargestellt.

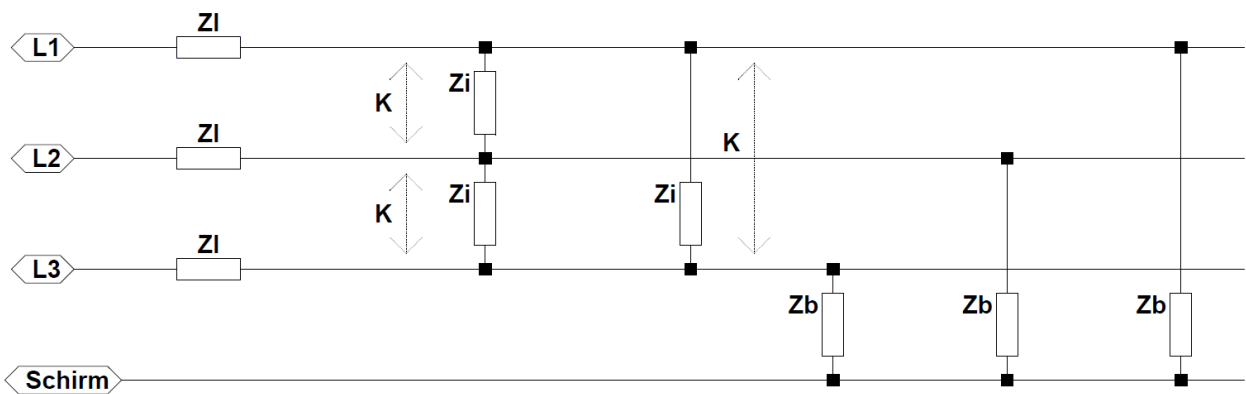


Bild 5: Ersatzschaltbild geschirmte Motorleitung mit drei Phasen [5]

Eine Simulation mithilfe eines Übertragungsnetzwerkes wie in Abschnitt 3.2 kann auf die geschirmte Leitung nicht angewendet werden. Es werden keine verlässlichen Ergebnisse erzielt. Es müssen verschiedene Phänomene in Betracht gezogen werden. Diese können in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

3.4 Impedanzverhalten geschirmte Motorleitung

Die Impedanzmessung aus Bild 3 wird auch auf die Motorleitung angewendet. Bild 6 zeigt den Impedanzverlauf zwischen einer Phase und dem Anschluss zum Geflechschirm.

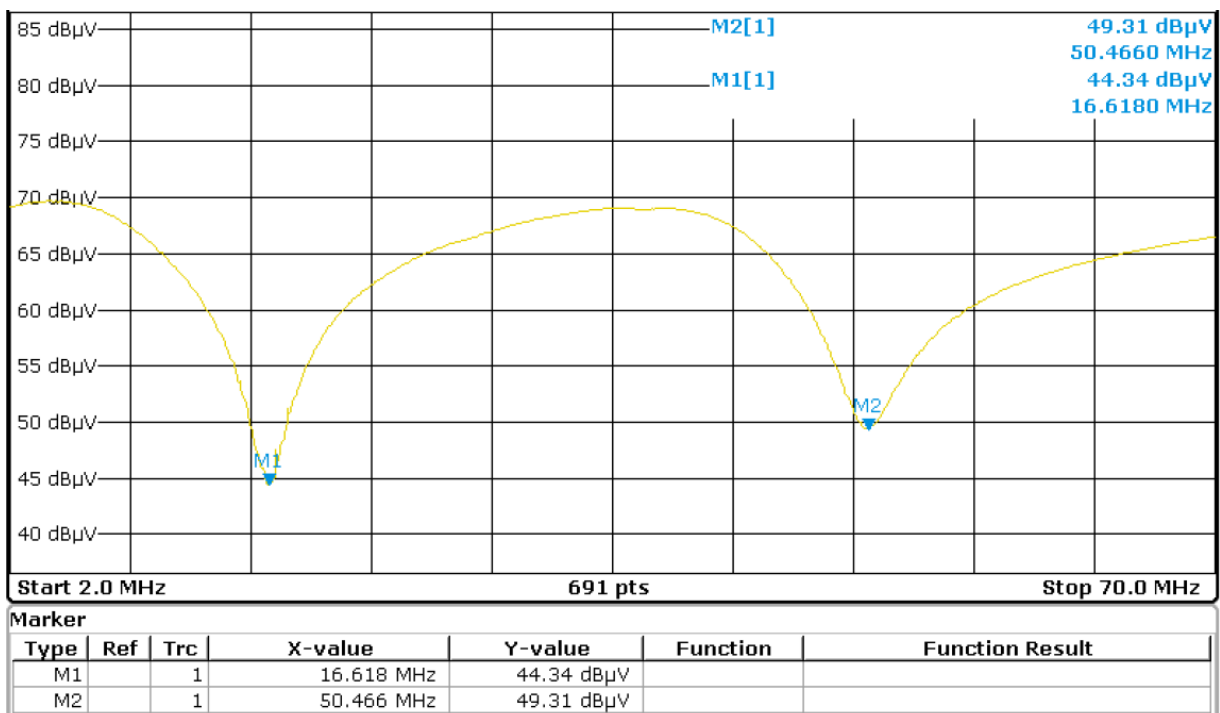


Bild 6: Impedanzverlauf geschirmte Motorleitung

Die Motorleitung besitzt zwei Resonanzstellen bei M1=16,6 MHz und bei M2=50,5MHz.

3.5 Impedanzmessung des Gesamtsystems

Wird die Motorleitung mit der Zuleitung der Kraftstoffpumpe verbunden, kann das Impedanzverhalten des Gesamtsystems gemessen werden. Bild 7 stellt das Ergebnis der Impedanzmessung über dem Frequenzbereich dar.

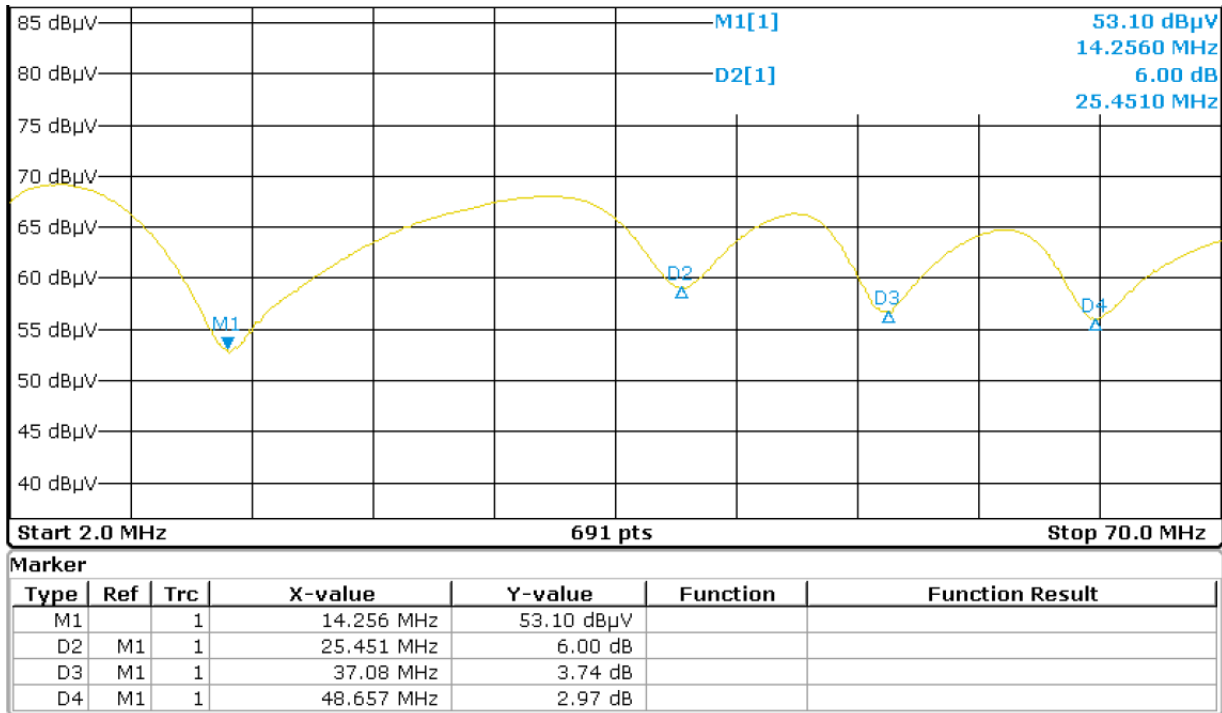


Bild 7: Impedanzverhalten des Kraftstoffpumpensystems ohne Steuergerät

Der Impedanzverlauf weist Resonanzstellen bei M1=14,3 MHz, D2=25,5 MHz, D3=37,1 MHz und D4=48,7MHz auf. Resonanzstelle M1 grenzt an den Frequenzbereich der Nahfeldkommunikation (NFC, 13,5MHz bis 13,9MHz), Resonanzstelle D1 an den Frequenzbereich des CB-Funks (26,5MHz bis 29,7MHz). Der OEM definiert fahrzeugspezifische Grenzwerte für diese Frequenzbereiche. Diese Grenzwerte müssen eingehalten werden.

4 Systemuntersuchung mit Nahfeldsonde

Das Steuergerät wird gemäß Messaufbau (Bild 1) betrieben. Die Schirmung ist im Steuergerät mit Masse verbunden. Am Stecker wird mit der Nahfeldsonde der hochfrequente Störstrom auf dem Leitungsschirm mit dem Oszilloskop gemessen (Bild 8). Im Zeitbereich auf der rechten Seite ist zu sehen, dass der Störstrom (C2, rot) während des Schaltvorgangs mit steigender Flanke (C1, gelb) die stärkste Ausprägung zeigt. Die Darstellung im Frequenzbereich auf der linken Seite lässt dem Störstrom die Frequenzen 12MHz ($f_{STÖR1}$) 35MHz ($f_{STÖR2}$) und 51MHz ($f_{STÖR3}$) zuordnen. Durch die Ausgangskapazitäten im Steuergerät wird die Impedanz und somit die Strömstromcharakteristik beeinflusst. Die Resonanzstellen M1 und D3 verschieben sich leicht im Vergleich zu Bild 7 hin zu niedrigeren Frequenzen. Die Resonanzstelle D2 ist im Störstromspektrum nicht zu sehen. Mit den Erkenntnissen aus der Impedanzmessung kann folgendes festgestellt werden: Resonanzstellen im Impedanzverhalten des Kraftstoffpumpensystems können durch die Ansteuerung (Schaltvorgang mit steigender Flanke) des Motors angeregt werden. Der entsprechende Störstrom fließt über den Leitungsschirm ab.

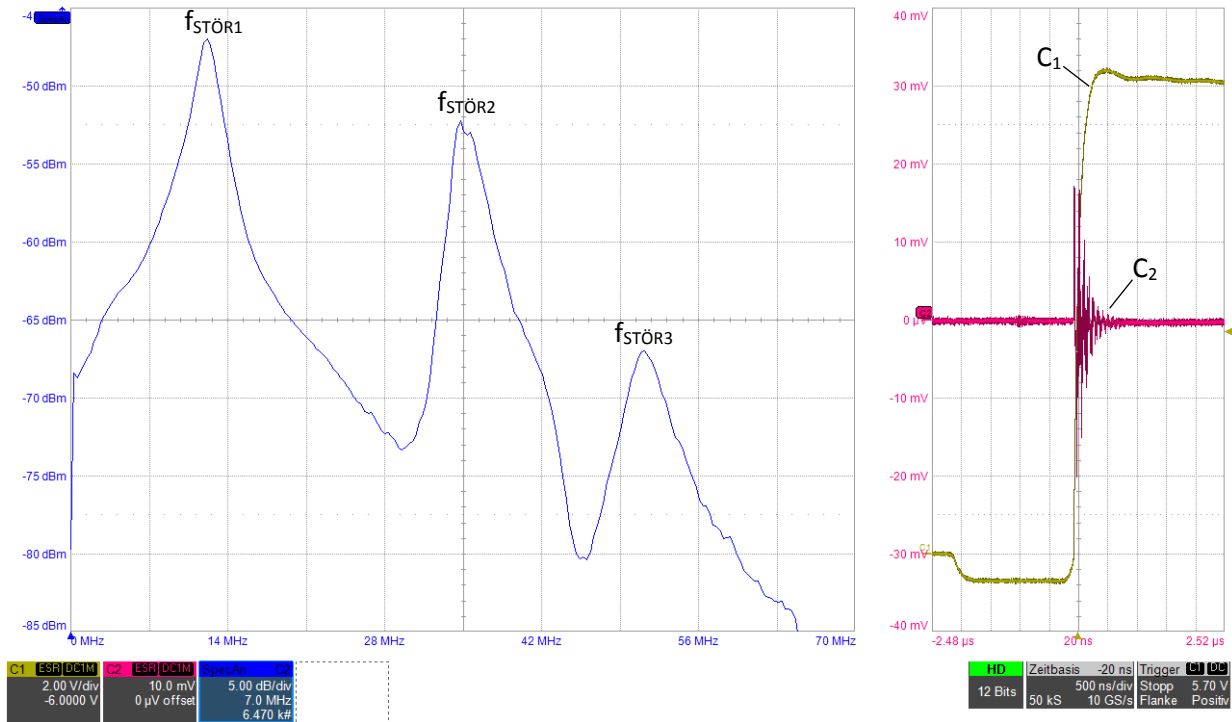


Bild 8: Messergebnis im Zeit- und Frequenzbereich des Störstroms (C2, rot) auf dem Leitungsschirm bei Anregung durch die steigende Phasenspannung (C1, gelb)

5 Systemuntersuchung in Stripline-Messung

Die Stripline Messung nach DIN EN 55025 mit den in Abschnitt 2 beschriebenen Abweichungen in der Leitungslänge führt zum Ergebnis in Bild 9 und Bild 10.

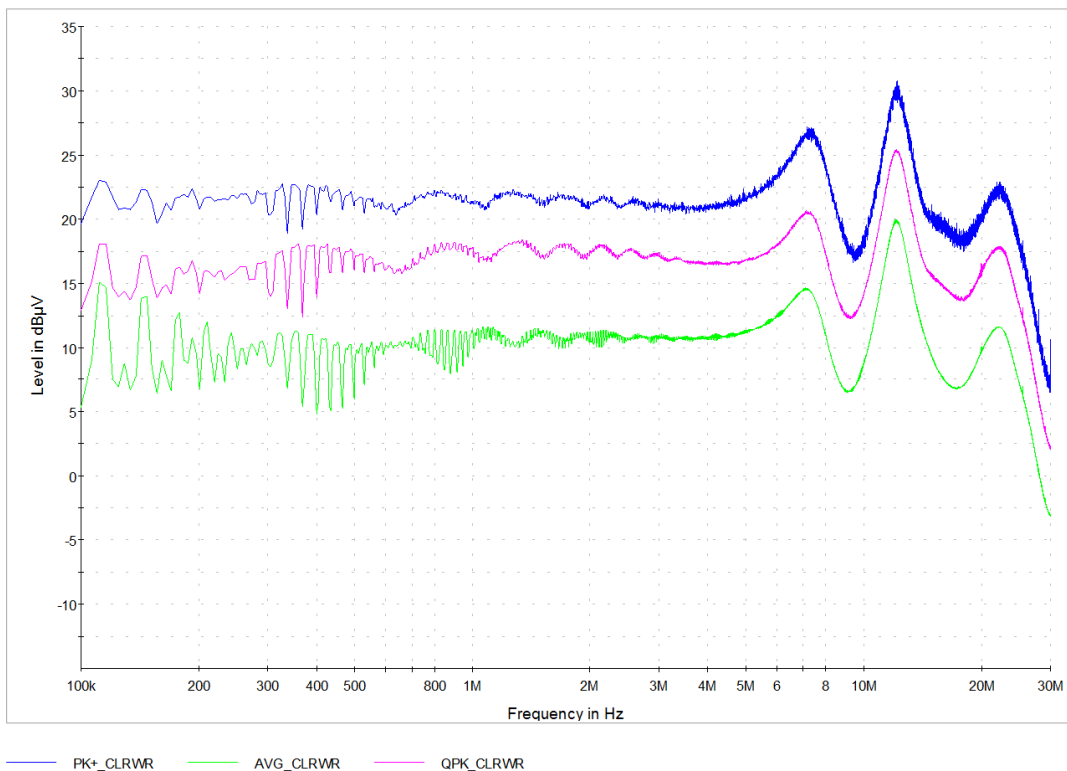


Bild 9: Stripline Messung 100kHz bis 30MHz, Bandbreite 9kHz

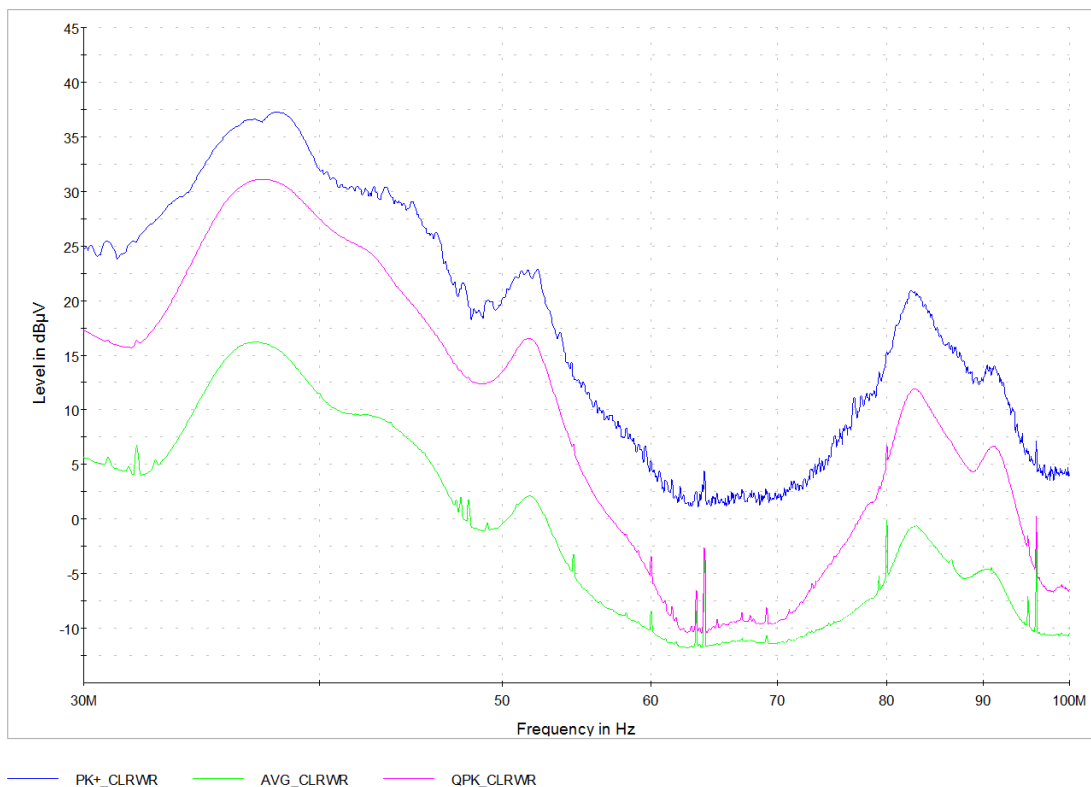


Bild 10: Stripline Messung 30MHz bis 100MHz, Bandbreite 120kHz

Neben den Störpegeln bei 12MHz, 36MHz und 52MHz sind Störungen bei 7MHz und 22MHz zu erkennen. Wird die Messung ohne Steuergerät unter dem Septum durchgeführt, reduziert sich der Störpegel bei 7MHz. Die Resonanzstelle D2 aus Bild 7 wird durch die Ansteuerung auch angeregt, sie fließt aber nicht als Störstrom über den Leitungsschirm ab. Die Voruntersuchungen aus Abschnitt 3 und 4 werden in der Stripline Komponentenmessung abgebildet. Die Stärke der Ausprägung ist abhängig von den Schaltgeschwindigkeiten der Leistungshalbleiter. Mit einer Kabellänge ähnlich einer UKW Antenne sind Störungen in diesem Bereich schwer zu unterdrücken. Diese Störpegel sind in Bild 10 zwischen 80MHz und 95MHz sichtbar.

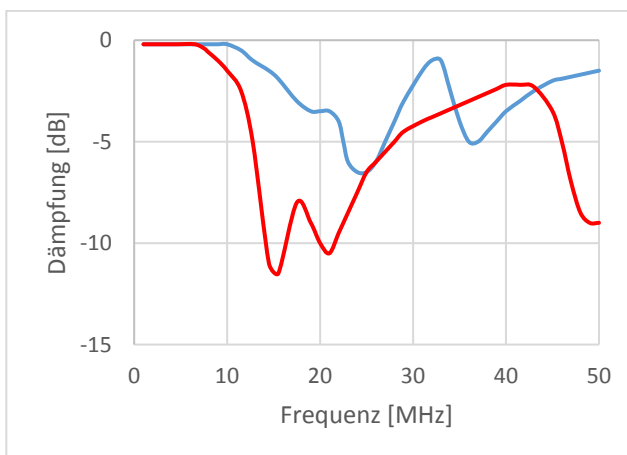


Bild 11: Impedanzverhalten im Serienfahrzeug (blau) und des dazugehörigen EMV Testaufbaus (rot)

Wird das Impedanzverhalten eines Fahrzeugs (Motorleitungslänge kleiner als ein Meter) mit dem dazugehörigen EMV Testaufbau (Länge 1800mm aufgrund anderer Anforderungen im Vergleich zum Aufbau aus Abschnitt 2) verglichen, kann man erkennen, dass eine geringere Leitungslänge Resonanzstellen in Richtung höherer Frequenzen verschiebt (Bild 11).

6 Zusammenfassung

Mithilfe der Impedanzmessung ist eine Vorhersage über das EMV Verhalten eines Kraftstoffpumpensystems noch vor dem ersten Schaltungsentwurf möglich. Resonanzstellen im Kraftstoffpumpensystem, welche für das Störverhalten maßgeblich sind, werden unter Vernachlässigung des Steuergeräts charakterisiert. Bei Anregung der Resonanzstellen mittels Blockkommutierung fließen Störströme über den Leitungsschirm ab. Diese sind in der Stripline Messung als erhöhter Störpegel sichtbar. Die Impedanzmessung gibt noch vor der ersten Messung Aufschlüsse darüber, wie das EMV Konzept auszusehen hat. Die benötigten Leistungshalbleiter können zielgerichteter ausgewählt und somit die Kosten genauer abgeschätzt werden. Das Verfahren der Impedanzmessung wird in einem aktuellen Entwicklungsprojekt genutzt um das EMV Verhalten verschiedener Kraftstoffpumpen im Zusammenspiel mit verschiedenen zukünftigen Fahrzeugtypen (unterschiedliche Leitungslängen) zu charakterisieren und vorherzusagen.

7 Literatur

- [1] J. Franz, *EMV Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen*, Springer 2013
- [2] J. Hippeli, U. Hilger, M. Diebig, S. Frei, *Simulatorische Bestimmung der Störeinkopplung durch leistungselektronische Komponenten in Kfz-Antennensysteme*, EMV Düsseldorf 2010
- [3] P. Hillenbrand, S. Tenbohlen, *Einfluss der Kabelschirmung der Batterie- und Motorkabel eines Traktionsinverters auf die Störspannung an der Bordnetz nachbildung*, EMV Düsseldorf 2016
- [4] DIN EN 55025 *Fahrzeuge, Boote und von Verbrennungsmotoren angetriebene Geräte - Funkstöreigenschaften - Grenzwerte und Messverfahren für den Schutz von an Bord befindlichen Empfängern*, 2008
- [5] Y. Weens, N. Idir, R. Bausière, and J. J. Franchaud, *Modeling and Simulation of Unshielded and Shielded Energy Cables in Frequency and Time Domains*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 7, JULY 2006