

Einfluss der Bordnetznachbildung auf Störfestigkeitsmessverfahren (z.B. BCI) oberhalb 100 MHz

Referent: Dr. Ralph Schertlen, Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Straße 2, 71701 Schwieberdingen, Germany, ralph.schertlen@de.bosch.com

Co-Autoren: Andrea Scholl, Robert Bosch GmbH, Hauptstraße 34, 77830 Bühlertal, Germany, andreamarie.scholl@de.bosch.com

Co-Autoren: Achim Kempe, Robert Bosch GmbH, Tübinger Straße 123, 72762 Reutlingen, Germany, achim.kempe@de.bosch.com

Co-Autoren: Dr. Jan Hansen, Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Straße 2, 71701 Schwieberdingen, Germany, jan.hansen@de.bosch.com

Co-Autoren: Roland Eidher, Robert Bosch GmbH, Tübinger Straße 123, 72762 Reutlingen, Germany, roland.eidher@de.bosch.com

1 Unterschiedliche Messergebnisse trotz standardisiertem Messaufbau

Bei Störfestigkeitsmessungen insbesondere im Frequenzbereich oberhalb 100 MHz kann man gelegentlich beobachten, dass Prüflinge (DUTs – **D**evice **U**nder **T**est) in einem Labor die Anforderungen einhalten, im anderen Labor jedoch nicht. Auf den ersten Blick verwundert dies, sind doch die Messaufbauten und Messmethoden standardisiert.

1.1 Einsatz von LISNs innerhalb und außerhalb ihrer Spezifikation

Gemäß ISO 11452-4 (Anhang C) ist eine Spezifikation von Bordnetznachbildungen (LISN) für das Störfestigkeitsverfahren „Bulk Current Injection“ (BCI) bis 108 MHz gefordert [1]. Allerdings werden sie im EMV-Praxisalltag häufig bis 400 MHz und darüber hinaus (max. 6 GHz im Automotive-Bereich) verwendet.

1.2 Messkette und Messaufbau

Der gesamte Messaufbau ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

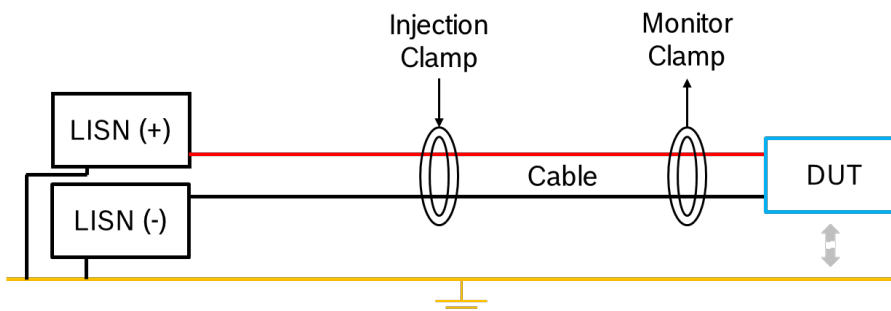


Bild 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

In Bild 1 finden sich: Links zwei (ideale) LISNs; rechts das galvanisch entkoppelte DUT mit Differential-Mode-Impedanz (variabel) sowie einer nicht näher definierten, sondern

vom jeweiligen DUT abhängigen Common-Mode-Kapazität zwischen DUT(-Gehäuse) und Massefläche („Offset“-Kondensator); dazwischen Kabel sowie Einkopplung (Injection clamp) und Messzange (Monitor clamp).

Die Messkette wirkt derart, dass mittels einer Einspeisezange (injection clamp) ein Gleichtaktstrom in die Verbindungsleitung zwischen Versorgung und DUT eingeprägt wird. Etwas näher am Prüfling misst die Prüfzange (monitor clamp) den tatsächlich eingeprägten Gleichtaktstrom. Der Prüfling wird betrieben und darf trotz eingeprägtem Gleichtaktstrom nicht ausfallen.

1.3 Spezifikation und Kalibrierung

Die Komponenten des Messaufbaus aus Bild 1 sind wie folgt spezifiziert:

- LISN – 100 kHz bis 108 MHz; frequenzabhängige Impedanz; regelmäßig kalibriert
- Einkoppel- und Überwachungszange – 10/100 kHz bis 400 MHz / 1 GHz / 3 GHz
- Kabel – ab 0 Hz; keine obere Frequenzgrenze spezifiziert

Sämtliche Messgeräte sind mit 50 Ohm-Anschlüssen versehen. Die BCI-Zangen werden ab 100 kHz bis 400 MHz bzw. intern bis 1 GHz verwendet; LISNs bei RIA (Radiated Immunity Antenna) bis 6 GHz. Kabel bzw. Leitungen sind hinsichtlich Wellenwiderstand nicht näher spezifiziert, lediglich ihre Lage über der Massefläche ist festgelegt, der Abstand zwischen Kabel und Massefläche beträgt ca. 50 mm.

1.4 Pass/Fail – liegt es am Prüfling oder am Labor?

Simulativ wird (oberhalb 108 MHz, also außerhalb der LISN-Spezifikation) der Frage nachgegangen, ob sich hinter beobachteten Gelegenheitsausfällen (d.h. „Pass“ in Labor A, aber „Fail“ in Labor B) Zufallsereignisse oder Systematiken verbergen. Insbesondere wollen wir untersuchen, warum ein DUT bei der Messung zwischen 108 MHz und 1 GHz in einigen Laboren ausfällt, in anderen jedoch bei gleichem Aufbau besteht. Es soll die Frage beantwortet werden: Ist das Pass/Fail-Verhalten ein grundsätzliches Problem des Prüfaufbaus, ein stochastisches DUT-Problem oder ein systematisches Problem durch Impedanzfehlpassung von DUT bzw. LISN?

Hierzu werden neben Koppeleffekten und parasitären Elementen auch die frequenzabhängigen Impedanzen der einzelnen Komponenten des Messaufbaus betrachtet.

2 Impedanz von LISNs und Kabel

Nachfolgend werden die relevanten Komponenten des Messaufbaus in Einzelbetrachtung dargestellt. Diese sind: LISN respektive deren Impedanzverhalten; Kabel(-baum); DUT; Koppelkapazität zum Messtisch.

2.1 Impedanzen von LISNs

Die Impedanz einer LISN ist normativ bis 108 MHz definiert. Oberhalb von 108 MHz variiert diese teils stark, da der Einfluss der parasitären Elemente innerhalb der LISN zunimmt.

Um mehr über das Impedanzverhalten von LISNs zu erfahren, wurden einige Untersuchungen am Beispiel des BCI-Verfahrens durchgeführt. Messungengenauigkeiten bei der Impedanzbestimmung (insbesondere oberhalb von 108 MHz) sind z.B. abhängig von:

- der Notwendigkeit für eine Adaption zwischen den Anschlussklemmen einer LISN und dem koaxialen Anschluss eines Messkabels (Jig)
- den zulässigen Herstellertoleranzen LISN {A} ≠ LISN {B} ≠ LISN {C}

Beispielhafte Ergebnisse für LISN-Impedanzen (mit Jig) finden sich in Bild 2. Weiterhin wird die ideale (50 Ohm oberhalb 10 MHz) und eine 'EqMo' (äquiv. Modell, grobe Hüllkurve) Impedanzkurve dargestellt.

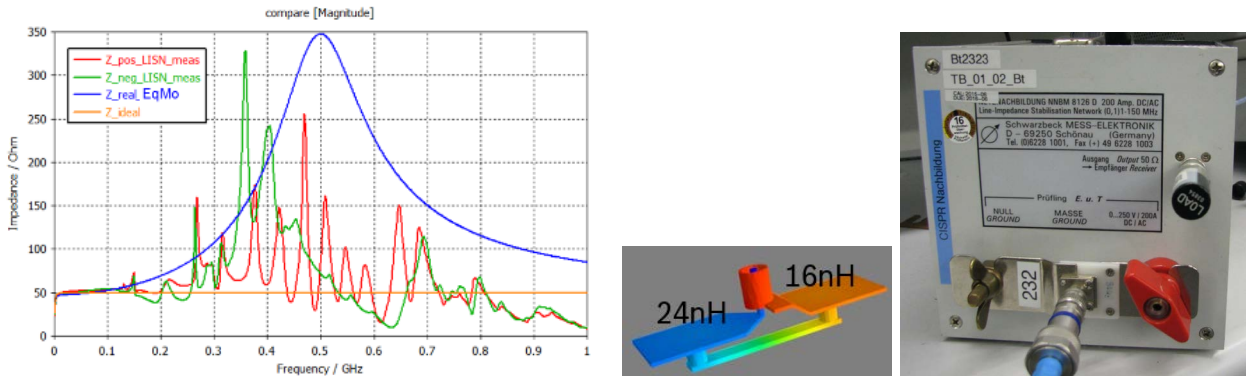


Bild 2: Impedanz von LISNs (ideal (orange), 'EqMo' (blau) und 2 gemessene).

Man erkennt, dass jede der beiden gemessenen Impedanzkurven zweier unterschiedlicher LISNs stark vom Wunsch- bzw. Datenblattwert 50 Ohm im Frequenzbereich oberhalb 125 MHz abweicht. Jede LISN für sich weicht dabei auf ihre eigene Art ab. Die eine LISN, zu der die grüne Impedanzkurve gehört, hat ihr Impedanzmaximum bereits bei 350 MHz. Die andere LISN, zu der die rote Impedanzkurve gehört, hat ihr Impedanzmaximum hingegen erst bei 470 MHz. Bei beiden schwankt der gesamte Verlauf oberhalb von 125 MHz sehr stark.

Es wurde auf Basis der roten Messkurve ein Ersatzmodell mit einem RLC-Parallel-schwingkreis im Auskoppelpfad entworfen, um das Impedanzverhalten bis 1 GHz mit einer Hüllkurve abzubilden und ein Netzwerksimulationsmodell aufsetzen zu können.

Die beiden Schaltbilder – sowohl der idealen LISN als auch der um Parasiten erweiterten 'EqMo'-LISN – sind in Bild 3 dargestellt.

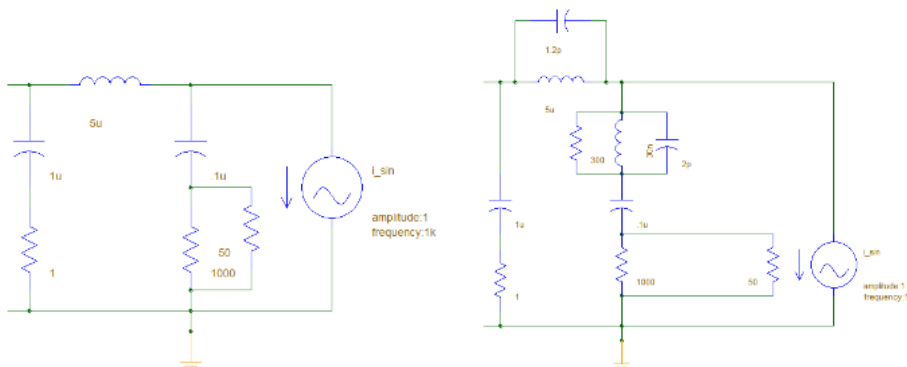


Bild 3: Schaltbild der idealen LISN (links) und Ersatzschaltbild einer „Hüllkurven-LISN“ (rechts).

Einen BCI-Messaufbau mit von 50 Ohm abweichenden LISN-Impedanzen abzuschließen muss nicht zu „Fail“ Ergebnissen führen. Wie steht es jedoch um die konsistente Bewertung der Testergebnisse in Labor A gegenüber Labor B? Bisher wurden entweder Prüfling oder Messaufbau als Ursache für Gelegenheitsausfälle vermutet.

2.2 Einfluss der Kabel

Im BCI-Messaufbau liegen die Kabel ca. 50 mm über dem leitfähigen Messtisch. Interessant, wenngleich auch nur eingeschränkt im Verdacht stehend, Gelegenheitsausfälle zu verursachen, da der Aufbau in allen Laboren ausreichend gute Ähnlichkeit bezüglich der Kabellage aufweist, ist der Verlauf der S-Parameter über der Frequenz. Abhängig von der Leitungslänge sieht man Resonanzeffekte sowohl bei der Übertragung (S_{31}) als auch bei der Reflexion eingespeister Signale (S_{11}). Der Verlauf der S-Parameter über der Frequenz für ein Kabel der Länge 750 mm ist in Bild 4 dargestellt.

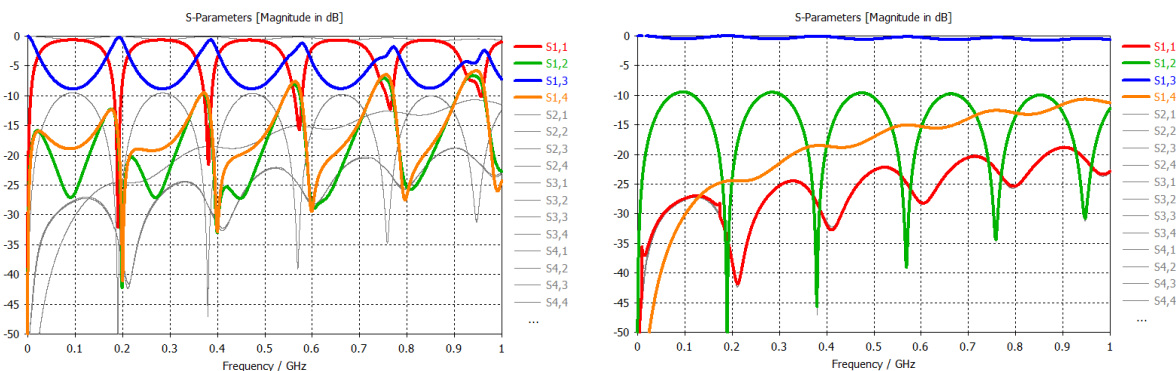


Bild 4: S-Parameter einer Zweidrahtleitung über einer Massefläche, jeder Draht mit einem Port gegen die Massefläche abgeschlossen. Linkes Bild: Abschluss mit 50 Ohm-Ports; rechtes Bild: Abschluss mit 270 Ohm-Ports.

Bei einem Aufbau mit zwei Drähten und einer Massefläche ergeben sich drei unterschiedliche Permutationen für den Stromfluss (Fall 4 ohne Massefläche wäre eine schlichte Zweidrahtleitung) und damit auch drei verschiedene Wellenwiderstände.

1. Der Strom fließt über beide Drähte hin und über die Massefläche zurück (Gleichtaktfall) => $Z = 200 \text{ Ohm}$
2. Der Strom fließt über einen Draht hin und hälftig über die Massefläche sowie den anderen Draht zurück => $Z = 270 \text{ Ohm}$
3. Der Strom fließt über einen Draht hin und über die Massefläche zurück (so als wäre der zweite Draht gar nicht vorhanden) => $Z = 300 \text{ Ohm}$

Schließt man jeden Draht mit einem 50 Ohm-Port ab, so erhält man den welligen Verlauf für die S-Parameter mit Bergen und Tälern im definierten Verhältnis von Leitungslänge und Frequenz (d.h. Wellenlänge). S_{11} (rot) lässt z.B. bereits bei ~100 MHz so gut wie keine Leistung auf den Draht, S_{31} (blau) hat deswegen sehr wenig Durchgang, d.h. am anderen Ende des Drahts kommt keine Leistung an, da sie vom Port bereits gar nicht eingespeist werden kann. Gleiches gilt bei ~300 MHz, ~450 MHz usw.

Schließt man hingegen jeden Draht mit einem 270 Ohm-Port ab, so erhält man den glatten Verlauf für die S-Parameter mit einem Verhalten wie man es für widerstandsangepasste Verhältnisse kennt und erwartet (S_{11} (rot) sehr niedrig, S_{31} (blau) bei ca. 0 dB).

Das Verhalten des Kabels muss in der Gesamtanordnung mit bedacht werden, da näherungsweise bei den Frequenzen, bei denen mit 50 Ohm-Ports der S-Parameter S_{11} nahe bei 0 dB ist und S_{31} deutliche negative Werte aufweist, das DUT von den LISNs de facto entkoppelt ist („entkoppelte Frequenzen“). Bei anderen Frequenzen (S_{11} deutlich negativ, S_{31} nahe 0 dB) findet eine starke Wechselwirkung zwischen LISN (mit ihrem diffusen Impedanzverlauf oberhalb 100 MHz) und DUT statt.

Dies erklärt, dass bei den „entkoppelten Frequenzen“ die Impedanz der LISNs auf Grund des Kabelverhaltens wenig bis gar nicht relevant ist. Andererseits kann auch in dem Fall (also bei all den Frequenzen), in dem die LISN eine Impedanz deutlich größer als 50 Ohm hat, aus der vorigen „Entkopplung“ nun eine einseitige Anpassung (oder zumindest ähnlich) werden, wenn die Leitung bedingt durch den hohen Impedanzwert der LISN schlichtweg angepasster abgeschlossen ist.

2.3 DUT – Annahmen zur Simulation

Die zu vermessenden Objekte decken die ganze Bandbreite an Elektronik ab. Es fängt an bei kleinen Sensoren mit hochohmigen Impedanzen in Richtung Kabelbaum, geht über Steuergeräte mit mittleren Impedanzen bis schließlich zu Komponenten der Leistungselektronik mit sehr geringen Impedanzen.

Um diesen breiten Strauß an Kabelbaumabschlüssen durch unterschiedliche DUTs abzudecken, wurden exemplarisch mehrere verschiedene Dummy-DUTs angenommen.

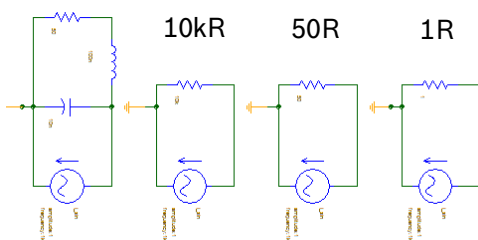


Bild 5: Beispiele für unterschiedliche DUT-Impedanzen.

Ergebnis der Simulation und damit auch Fazit ist wie erwartet, dass die DUT-Impedanz nur eine sehr untergeordnete bis gar keine Rolle spielt, da Gleichtaktstörungen untersucht werden und es folglich egal ist, wie groß die Impedanz ist, die im Gleichtakt über der Massefläche schwebt.

2.4 Koppelkapazität zwischen DUT und Messtisch

Ein wesentlicher Faktor für Gleichtaktstörungen ist die Koppelkapazität zwischen DUT und Messtisch, die durch DUT-Gehäuse (o.ä.) und Messtisch gebildet wird. Diese Kapazität hängt vorwiegend von der Gehäusegröße des DUT ab und berechnet sich näherungsweise nach der bekannten Kondensatorformel $C = \epsilon \cdot A / d$. Sie liegt im Bereich von einigen bis einigen zehn Pikofarad.

Simulationen zeigen zwar, dass diese Kapazität eine große Rolle für die Gleichtaktstörungen spielt. Allerdings genügt dies nicht zur Erklärung der gelegentlichen

Ausfälle, da sie zwar von DUT zu DUT durchaus stark schwanken kann, jedoch für ein und dasselbe DUT bei verschiedenen Laboraufbauten weitgehend konstant bleibt.

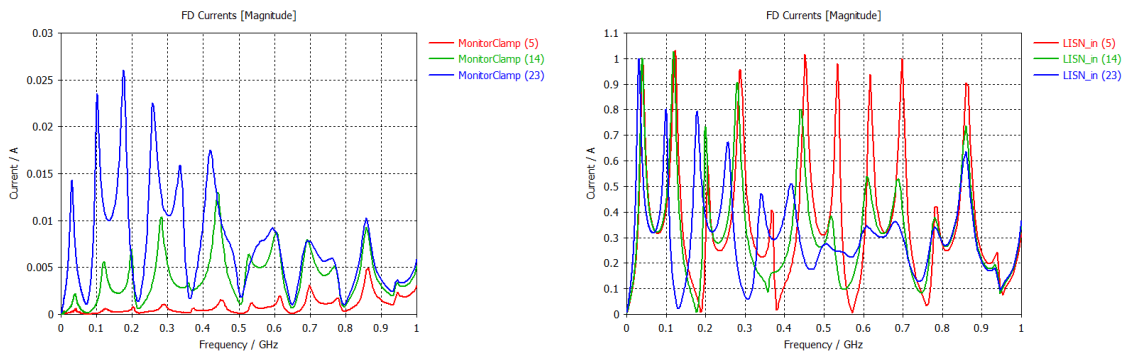


Bild 6: Variation der Ströme auf Grund unterschiedlicher DUT-zu-GND-Kapazitäten. Links: Strom in der Überwachungsmesszange; rechts: Strom in die U_Bat-LISN; jeweils 1, 10, 100 pF Offset-Kapazität.

3 Simulation des Gesamtaufbaus und Simulationsergebnisse

Um mit den oben dargestellten Erkenntnissen über das Einzelverhalten der Systemanteile das Gesamtsystem mit Blick auf die Fragestellung zu untersuchen, wurden Simulationen mit Variation von DUT, Variation der parasitären Kapazität zwischen DUT und Masseebene, Variation der LISN und auch hinsichtlich des Übertragungsverhaltens des Kabels durchgeführt.

3.1 Koppelzangen

Für die Messzange wird ein validiertes Ersatzmodell auf Basis von Messungen aus der Simulationsdatenbank verwendet.

Die Einspeisezange wird nicht als gemessenes Ersatzmodell modelliert, sondern als ideale Quelle mit Innenwiderstand. Ersatzmodelle haben den Nachteil, dass sie zu sehr auf Rückwirkungen mit dem Gesamtsystem reagieren, was grundsätzlich in Ordnung ist. Im Falle dieser Untersuchungen ging es jedoch darum, bei definiert eingprägtem Strom klare Aussagen machen zu können über Unterschiede im Messergebnis an der Messzange, wenn reproduzierbar der gleiche Strom eingprägt wird. Als „ideale Quelle mit Innenwiderstand“ kommt eine Spannungsquelle mit 134 V zum Einsatz, der Innenwiderstand beträt 39 Ohm [2]. (Hinweis: eine ideale Stromquelle ohne Innenwiderstand lässt sich einfach implementieren, führt aber zu falschen Ergebnissen, da sie auf Grund ihres unendlich hohen Innenwiderstands die LISN-Seite und die DUT-Seite voneinander entkoppelt.)

3.2 Kabel, DUT und Koppelkapazität

Die oben zu den Einzelkomponenten angeführten Ergebnisse stammen teilweise aus den Systemsimulationen, deswegen werden nachfolgend zu Kabel, DUTs und parasitärer Koppelkapazität zwischen DUT und Messplatte keine weiteren Ergebnisse präsentiert. Der Fokus liegt ausschließlich auf den Variationen, die von unterschiedlichen LISNs verursacht werden.

3.3 Variationen der LISNs

Der unterschiedliche Impedanzverlauf der vier verschiedenen LISNs aus Bild 2 (links) wird im Gesamtsystem modelliert und als Ergebnis der Effekt auf den Strom in der Messzange observiert.

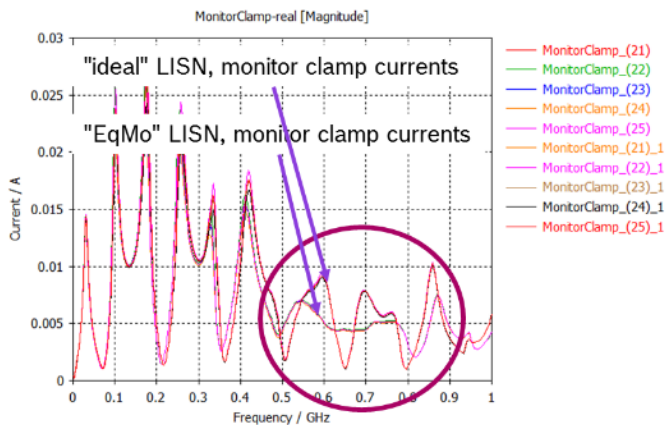


Bild 7: Einfluss von LISN-Variationen (aus Bild 2 ideal (orange) und 'EqMo' (blau)) auf Ströme der Überwachungsspule.

Man sieht insbesondere im Frequenzbereich zwischen ~500 MHz und ~800 MHz deutliche Unterschiede in den beiden Stromverläufen. Der Stromverlauf der „idealen“ LISN (mit konstant 50 Ohm) weist die leitungstypischen Berge und Täler auf. Der Stromverlauf der „EqMo“ LISN mit ihrer Impedanz von 350 Ohm bei 500 MHz zeigt einen geglätteten Stromverlauf, was auf den offensichtlich angepassteren Leitungsabschluss zurückzuführen sein dürfte.

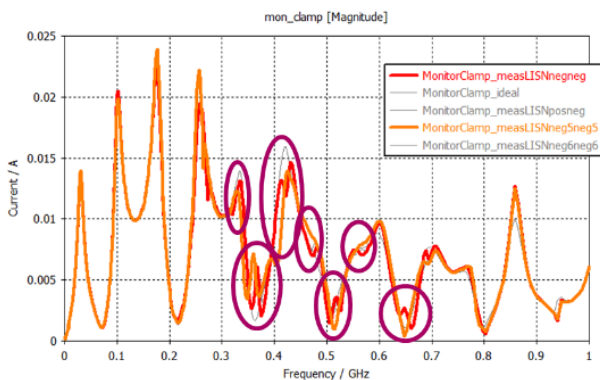


Bild 8: Einfluss von LISN-Variationen (aus Bild 2; gemessene (rot und grün)) auf Ströme der Überwachungsspule.

Für die beiden realen, d.h. gemessenen LISNs aus Bild 2 (rote und grüne Kurve) ergeben sich die in Bild 8 dargestellten Kurven. Beide sind in weiten Bereichen auf den ersten Blick nah beieinander, jedoch weisen sie bei genauerem Hinsehen teilweise signifikante Unterschiede auf. Bei der vergleichenden Betrachtung ist zu beachten, dass man die

Werte jeweils an einem Frequenzpunkt vergleichen muss, d.h. bildlich gesprochen das Lot auf die x-Achse bilden.

Die Stromwerte jeweils an einem Frequenzpunkt (also x-Wert) weisen deutliche Unterschiede auf, teilweise über den Faktor 2 hinausgehend. Damit wird klar, dass dies je nach Rückkopplungsverfahren (Open-Loop / Closed-Loop) des Messzangenstroms zu den gesuchten Unterschieden zwischen verschiedenen Laboren und damit zur Ursache der Gelegenheitsausfälle führen kann.

3.3.1 Fazit aus der LISN-Variation

Im „Open-Loop-Verfahren“ findet keine Rückkopplung zwischen Mess- und Einspeisestelle statt. Hier zeigen die Simulationsergebnisse, dass abhängig von den unterschiedlichen LISN-Impedanzen der gleiche Prüfling bei zwei unterschiedlichen LISNs mit deutlich unterschiedlichen Strömen beaufschlagt wird, wodurch einmal ein „Pass“ und ein andermal ein „Fail“ resultieren kann.

Im „Closed-Loop-Verfahren“ wird der eingespeiste Strom auf Basis des Stroms in der Messzange geregelt. In diesem Fall bedeutet die simulativ ermittelte Stromvariation, dass der Prüfling durch Nachregelung des Einspeisestroms (und damit in manchen Fällen „Überregelung“) höhere Werte annimmt, als er eigentlich sollte. Auch dies kann besagtes „Pass/Fail“-Verhalten verursachen.

4 Schlussfolgerung

Unterschiedliche „Pass/Fail“-Ergebnisse bei BCI-Aufbauten sind durch deutliche Variationen des LISN-Impedanzverhaltens bei Frequenzen oberhalb 100 MHz gut erklärbar. Wie auch immer die Messstrategie aussieht (Open-Loop oder Closed-Loop), treten bei unterschiedlichen LISNs unterschiedliche Belastungen (bzw. Bestromungen) des DUT auf, die dazu führen können, dass in Labor A der Prüfling den Test besteht, wohingegen derselbe Prüfling in Labor B ausfällt.

5 Ausblick

Um für das beschriebene und simulativ sezierte Problem Abhilfe zu schaffen, wäre es notwendig, den Impedanzverlauf von LISNs im gesamten Messfrequenzbereich (also bis 400 MHz, 1 GHz oder 6 GHz) zu spezifizieren.

Literaturangaben

- [1] ISO 11452-4:2011(en), Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods, Annex C Artificial Network, C.2 AN impedance
- [2] Werner Storbeck: „Vergleichende Untersuchungen an EMV-Prüfeinrichtungen der Kraftfahrzeugindustrie“, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2000