

Bewertung der Störwirkung beliebiger Störquellen auf die digitale Kommunikation am Beispiel Automotive Ethernet

Dr.-Ing. Christoph Keller, Robert Bosch GmbH, AE/EMC1

Dr. sc.-techn. Jan Hansen, Robert Bosch GmbH, AE/EMC1

Dr.-Ing. Wolfgang Pfaff, Robert Bosch GmbH, AE/EMC1

1 Einführung

EMV-Emissionsmessungen haben die Aufgabe sicherzustellen, dass die Prüflinge keine Geräte in der Umgebung stören. Das wichtigste Messgerät hierfür ist seit Jahrzehnten der Messempfänger, der im Frequenzbereich schmalbandig in einem „Sweep“ die Störampplitude erfasst. Wenn das Messergebnis unter dem vorgegebenen Grenzwertverlauf liegt, hat der Prüfling bestanden. Die dieser Vorgehensweise zugrundeliegende Annahme ist, dass der Messempfänger die Störwirkung des Prüflings (Störquelle) auf andere (Störsenke) richtig darstellt. In der Anfangszeit der EMV waren die potenziell gestörten Geräte im Wesentlichen schmalbandige Empfänger (Rundfunkempfänger und Funkgeräte). Ein Messempfänger kann als eine Nachbildung solcher schmalbandiger Empfänger verstanden werden; dementsprechend korreliert der gemessene Pegel bei der Frequenz des Übertragungsbandes in diesen Fällen gut mit der beobachtbaren Störwirkung.

Im Laufe der Jahre sind viele weitere Geräte mit andersartiger Funktionsweise dazu gekommen, die potenziell gestört werden können. Besonders wichtig sind hierbei die digitalen Kommunikationssysteme, die inzwischen oft auch sicherheitsrelevante Daten übertragen, beispielsweise beim Kraftfahrzeug und dort in Zukunft auch verstärkt beim autonomen Fahren. Für die messtechnische Bewertung von Störern wird in der EMV derzeit jedoch unverändert der Messempfänger verwendet. In diesem Paper wird nach einer Betrachtung des Standes der Technik am Beispiel des „Automotive Ethernet“ messtechnisch untersucht, wie gut der Messempfänger, sowie die Messung der Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung die Störwirkung unterschiedlicher Störsignale auf die Übertragung charakterisiert. Auf Grund der Ergebnisse wird daraus ein Vorschlag für eine neue Messmethode abgeleitet und ein geeignetes Messgerät beschrieben.

2 Stand der Technik

2.1 RMS-AVG Detektor

Im technischen Bericht IEC-CISPR/TR 16-3 wurde vor ungefähr zehn Jahren aus einer ähnlichen Überlegung heraus eine umfangreiche Untersuchung vorgestellt, in der für verschiedenste digitale Kommunikationssysteme abgeleitet wurde, wie die Detektorkurve im Messempfänger zu verlaufen hat, um speziell die Störwirkung auf die digitale Kommunikation richtig abzubilden [1, Kapitel 4.8]. Das Ergebnis der umfangreichen Untersuchung war die Definition des sogenannten RMS-AVG-Detektors, dessen Verlauf (Dämpfung des angezeigten Pegels abhängig von der Puls wiederhol frequenz) zwischen den Kurven des RMS- und des AVG- Detektors liegt. Es wird jedoch schon in diesem Bericht darauf hingewiesen, dass die „Schutzanforderungen aller Dienste nicht im

gleichen Maß“ sichergestellt werden können und somit die gewählten Eckfrequenzen dieses Detektors als „Kompromiss“ zu betrachten sind [1, Kapitel 4.8.8]. Dass *ein* Detektor mit *einer* Detektorkurve nicht *alle* Kommunikationssysteme und dies zusätzlich noch für *alle* Störsignalformen richtig bewerten kann, liegt in der Natur der Sache. Schon allein der Vergleich der in diesem Kapitel dargestellten Kurvenscharen führt unmittelbar zu dieser Erkenntnis, denn die Differenz der letztlich definierten Detektorkurve zu den vielen dargestellten Messungen kann umgekehrt direkt als Bewertungsfehler hinsichtlich des Störpotenzials auf die betrachteten Kommunikationssysteme interpretiert werden.

2.2 APD Messung

Ein weiteres in diesem Report vorgestelltes Messverfahren ist die Messung der Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung (amplitude probability distribution - APD) eines Störers. Die APD einer Störgröße ist definiert als kumulierte Verteilung der Wahrscheinlichkeit der Zeit, während der die Störgröße einen festgelegten Pegel überschreitet. Zusammenfassend wird dazu festgestellt, dass dieses Verfahren eine der „wirksamsten Methoden zur Bewertung der Störwirkung auf digitale Kommunikationssysteme“ darstellt (1, Kapitel 4.7.7) und „auf Compliance Tests von einigen Produkten oder Produktfamilien, wie Mikrowellenöfen, anwendbar sein könnte“ (1, Kapitel 4.7.1). Zum Einsatz der APD-Messtechnik in diesem Zusammenhang gibt es mehrere Veröffentlichungen. Erwähnt sei hier die Veröffentlichung von K. Wiklundh [2], in dem eine vielversprechende direkte Verbindung verschiedener digitaler Modulationsverfahren mit den APD-Messkurven von Störern hergestellt wird.

3 Messungen an Automotive Ethernet

Um diese beiden Messverfahren hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Bewertung der Störwirkung eines Prüflings auf eine digitale Kommunikationstrecke konkret zu testen, wurde im Labor ein Testaufbau am Beispiel des Automotive Ethernets (1000BASE-T1) realisiert.

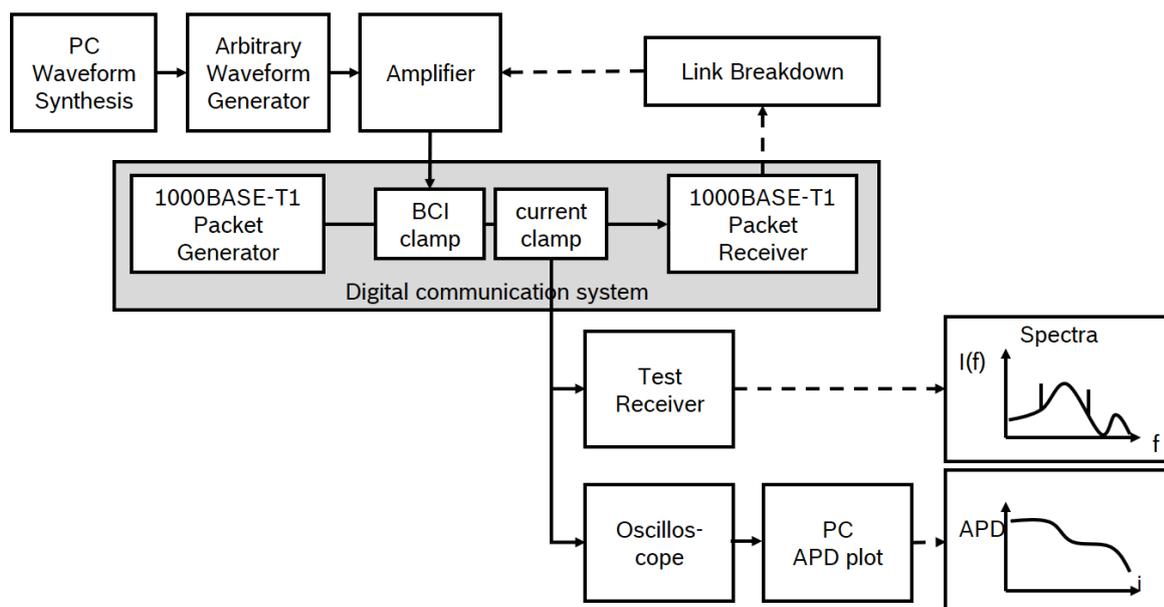


Bild 1: Testaufbau zur Störung von Automotive Ethernet als Blockschaubild

Dieses leitungsgebundene, im Basisband arbeitende Kommunikationssystem (PAM-3 bei 750 MBd), spielt insbesondere für zukünftige Anwendungen beim autonomen Fahren eine wichtige Rolle. Es wurde dazu eine Strecke aufgebaut, in der ein Sender und ein Empfänger miteinander kommunizieren. Der Testaufbau ist in Bild 1 als Blockschaltbild und Bild 2 links als Foto dargestellt.

Um den Einfluss unterschiedlichster Signale auf dieses System zu untersuchen, wurden viele unterschiedliche generische Testsignale in einem Mathematikprogramm generiert, u.a. Signale mit Amplituden- und Frequenzmodulation, Rauschsignale, Pulsfolgen und pulsmodierte Sinussignale in unterschiedlichsten Parametrisierungen, siehe Bild 2 rechts für einige Beispiele. Diese Signale wurden mit Hilfe eines Arbitrary-Waveform-Generators erzeugt und über einen Verstärker mittels einer BCI-Stromeinspeisenzange auf die Strecke eingekoppelt.

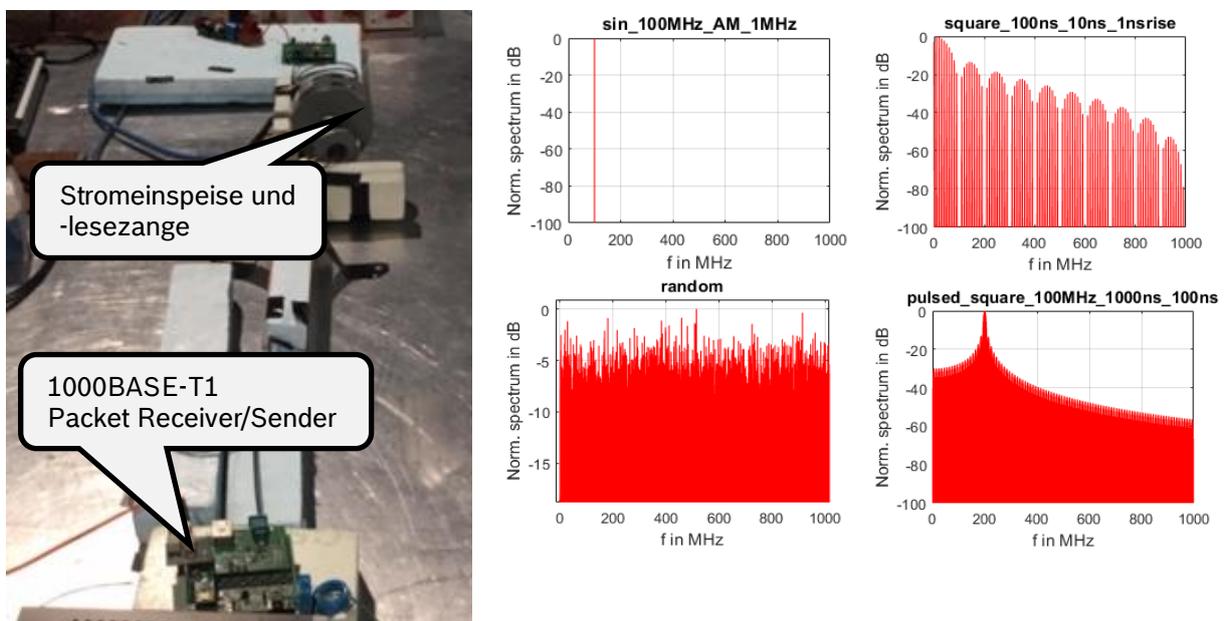


Bild 2: links: Testaufbau zur Störung von Automotive Ethernet
rechts: Beispiele für verschiedene Signalformen (Spektrum)

Der Pegel des Störsignals wurde jeweils so lange erhöht, *bis eine definierte Störung der Kommunikation* erfolgte. Da das Einstellen einer bestimmten Bitfehlerrate schwierig war, wurde der Linkabbruch als Kriterium gewählt. Der Linkabbruch trat bei Wiederholungen aller Tests sehr gut reproduzierbar jeweils bei den gleichen Pegeln auf. Es sei noch erwähnt, dass der Bereich vom Auftreten der ersten Bitfehler bis hin zum Linkabbruch sehr klein war.

Für diese Störsituation wurde dann sowohl mit dem Messempfänger als auch mit dem Oszilloskop der Störstrom auf dem Kabel über eine Strommesszange gemessen und aus der Oszilloskop-Messung die APD berechnet. In Bild 3a und 3b sind exemplarisch die Messergebnisse für einige ausgewählte Störsignale einander gegenübergestellt. Bild 3a zeigt ein Rauschsignal mit weißem Rauschen im Vergleich mit einem 600 MHz Rechteckpuls, in Bild 3b sind zwei pulsmodierte Sinussignale dargestellt. Oben ist jeweils der auf dem Kabelbaum gemessene Zeitverlauf des eingepprägten Störstroms

dargestellt, unten links die zugehörigen Messempfängermessungen und rechts die aus dem Zeitverlauf berechneten APDs.

Bei der Interpretation der Messkurven ist zu beachten, dass hier stets Kurven miteinander verglichen werden, welche *das selbe* Störpotenzial auf die Kommunikation aufweisen, nämlich das Auftreten eines Linkabbruchs. Im Gegensatz zum üblichen Vergleich verschiedener Emissionsmessungen ist somit bei dieser Betrachtung ein Störer *umso kritischer, je niedriger* die zugehörigen Messkurven sind.

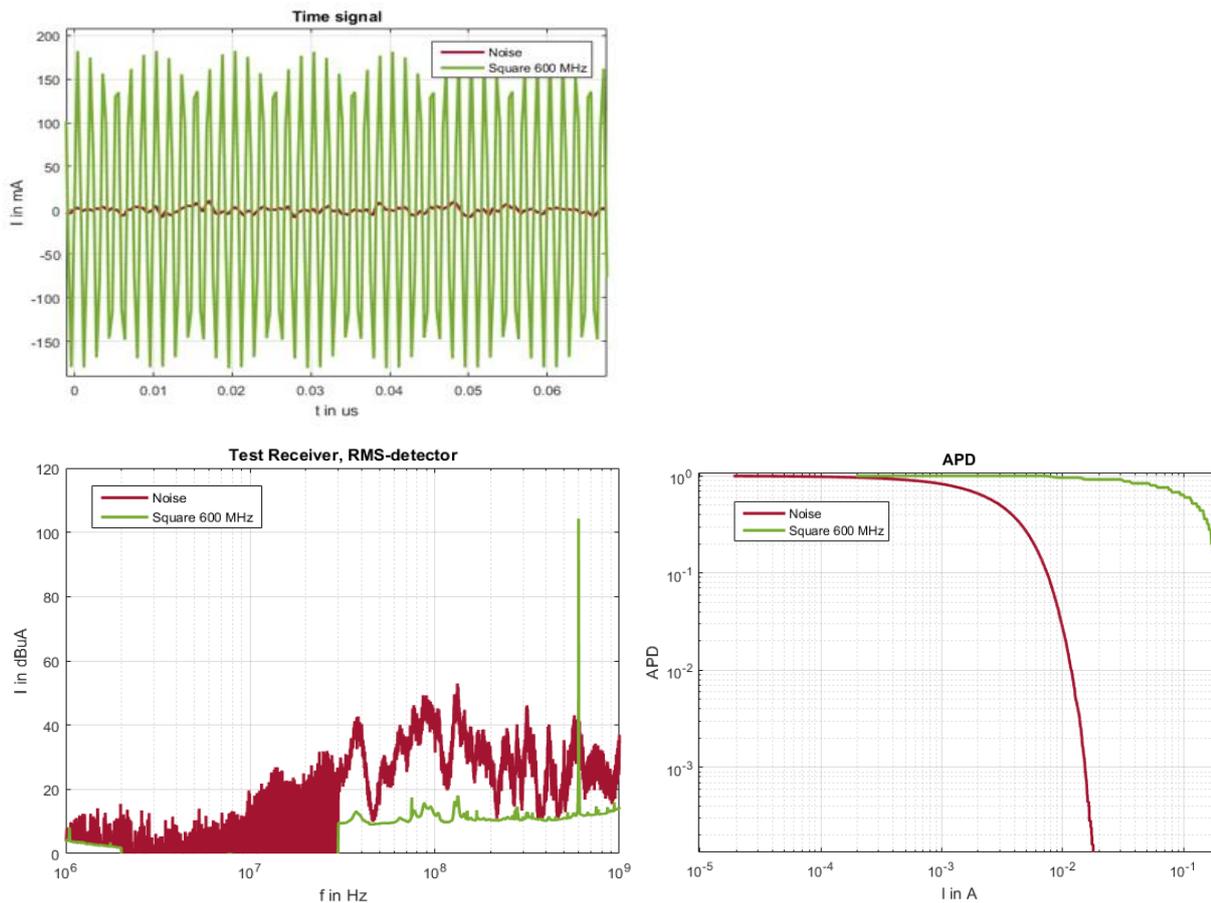


Bild 3a Exemplarische Messergebnisse des Störstroms *beim Linkabbruch*
 Rauschen und 600 MHz Puls
 oben: Zeitsignale, unten links: Messempfängermessungen, unten rechts: APDs

Die Messergebnisse für die unterschiedlichen applizierten Störsignale liegen für beide Messverfahren weit, teilweise sogar extrem weit auseinander. Diese Tatsache bedeutet, dass *keines dieser Messverfahren einen Störer hinsichtlich seines Störpotenzials auf die Störung der Automotive-Ethernet-Kommunikation korrekt bewerten kann*. Ein Messverfahren kann nur dann sinnvoll zur Bewertung und dem Vergleich von Störern eingesetzt werden, wenn es in Lage ist, die Störwirkung auf das betrachtete Zielsystem richtig abzubilden. Zum anschaulichen Vergleich sei hier die Bewertung eines Prüflings hinsichtlich der Störung des Radioempfangs mit Hilfe eines Messempfängers erwähnt. Wenn hier beispielsweise mit einer Bandbreite von 120 kHz im UKW-Bereich der Pegel aufgenommen wird, ist dieser ein sehr gutes Maß für die Störung des Radioempfangs, d.h. unabhängig von der Signalform des Störers kann zuverlässig ein Grenzwert definiert werden, dessen Unterschreitung einen störungsfreien Radioempfang sicherstellt. Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass der Messempfänger zur Zeit seiner Einführung

letztlich eine Nachbildung der damals typischen Störsenken darstellt, nämlich die schmalbandigen analogen Empfänger für Rundfunk oder Funkdienste.

Eine weitere Erkenntnis aus dem Vergleich der Messkurven ist, dass die Kommunikationsstrecke auf breitbandiges Rauschen am empfindlichsten reagiert (die zugehörigen Kurven sind für alle drei Darstellungen stets die niedrigsten), auf Schmalbandsignale am robustesten (die zugehörigen Kurven sind stets die höchsten).

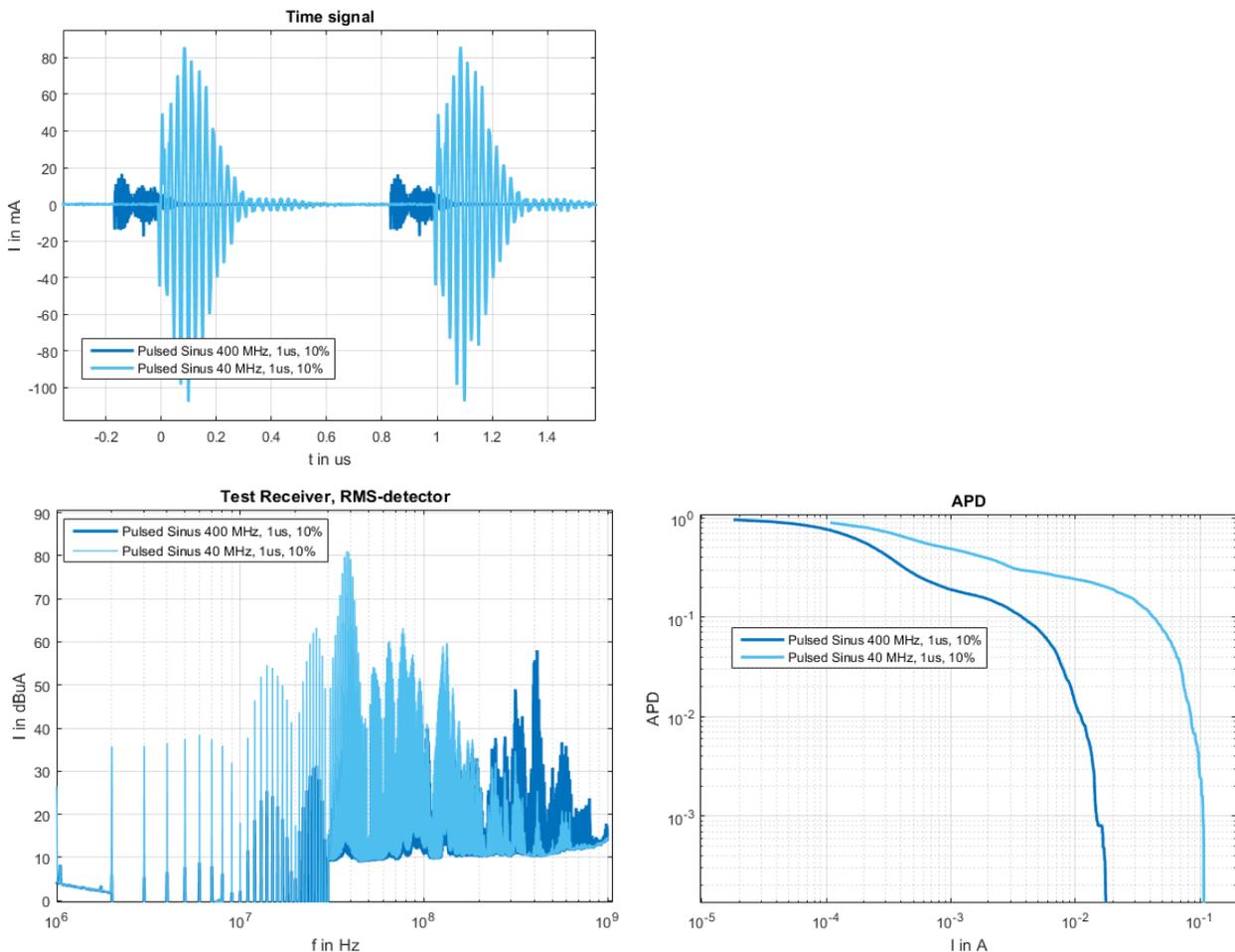


Bild 3b Exemplarische Messergebnisse des Störstroms *beim Linkabbruch*
Pulsmodulierter Sinus (40/400 MHz Sinus, 1 MHz Puls)
oben: Zeitsignale, unten links: Messempängermessungen, unten rechts: APDs

4 Korrelation zur CISPR 25 Stromemissionsmessung

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, was die mit dem Messem Empfänger gemessenen Kurven in Bezug auf typische Grenzwerte bedeuten, wird folgendes Szenario betrachtet: Im selben Kabelbaum liegen unmittelbar neben den Kommunikationsleitungen die Leitungen eines Störers, wie in Bild 4 links dargestellt.

Mit einem bewusst einfach gehaltenen Koppelmodell wird die Stromübertragungsfunktion von dem Strom im störenden System auf das Kommunikationssystem ermittelt (Bild 4 rechts). Es ergibt sich ein Anstieg von 40 dB/dek bis knapp 100 MHz, darüber ist die Übertragung frequenzunabhängig um 0 dB.

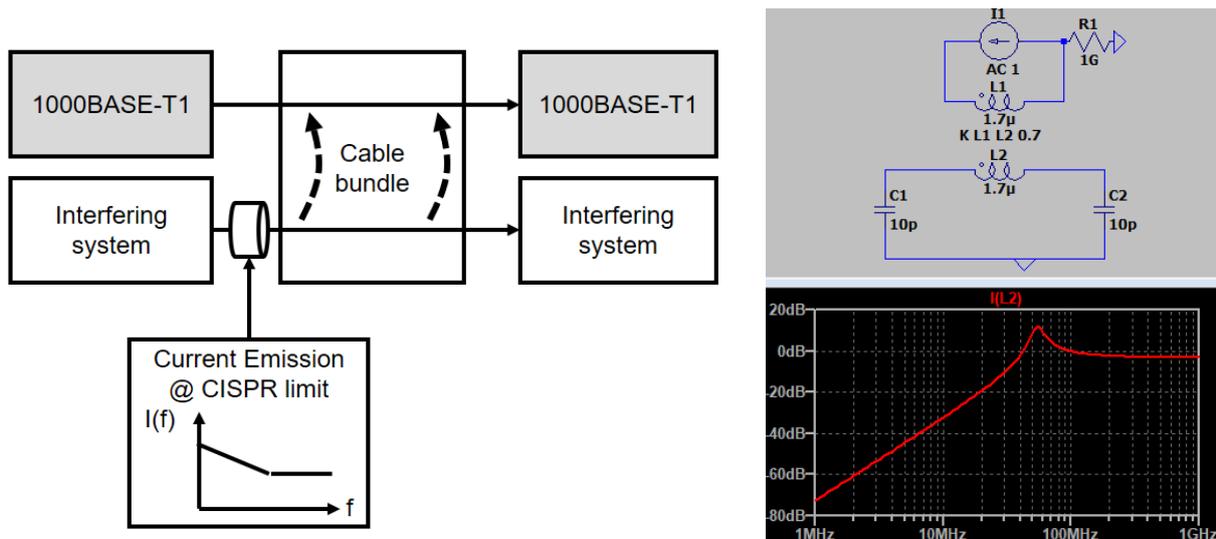


Bild 4: Störszenario und Ermittlung der Stromübertragungsfunktion

Mit dieser Übertragungsfunktion kann rechnerisch abgeschätzt werden, wieviel Störstrom auf das Kommunikationssystem eingekoppelt wird, wenn der Strom im störenden System beispielsweise angenommen den CISPR 25 Klasse 3 Grenzwert einhält (Bild 5 links). Aufschlussreich ist der Vergleich dieses Stromverlaufs mit den bisher diskutierten Messungen (Messempfänger), die jeweils für verschiedene Störsignale gerade einen Linkabbruch bewirkt haben.

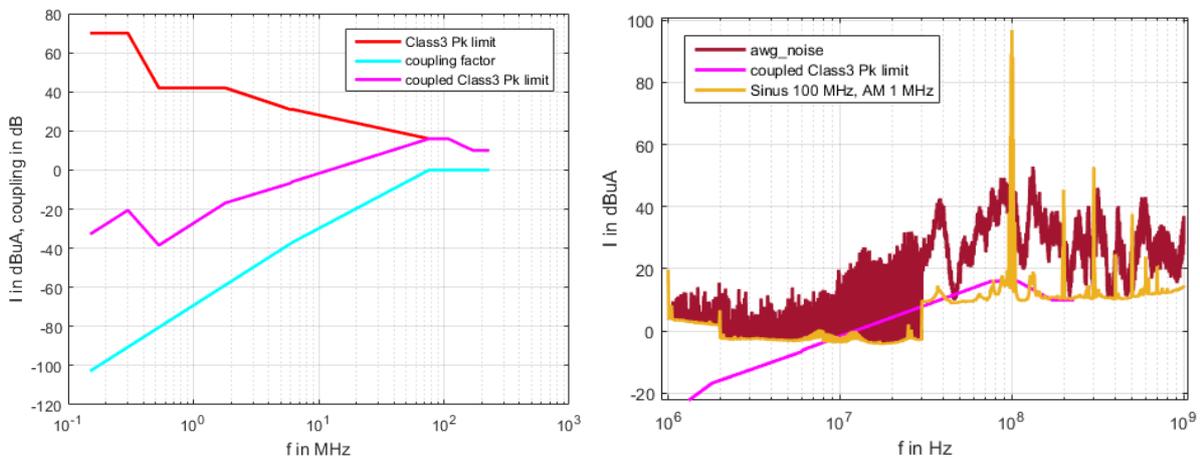


Bild 5 links: Übergekoppelter Strom auf das Kommunikationssystem für einen Störer, der genau entlang des CISPR 25 Class 3 Grenzwertes verläuft
rechts: Vergleich dieses Stromes mit den Messempfängermessungen für ein Rauschsignal und ein amplitudenmoduliertes Sinussignal (die beide einen Linkabbruch bewirken)

In Bild 5 rechts ist der übergekoppelte Strom mit einem Rauschsignal sowie einem amplitudenmodulierten Sinussignal zusammen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Strom deutlich unter den anderen Kurven liegt. Das bedeutet, dass ein störendes System, das diesen Grenzwert einhält, nicht in der Lage ist, die Kommunikation zu stören. Die Kurve liegt selbst gut 20 dB unter dem Rauschstörer, welches das kritischste (und somit niedrigste) Spektrum zeigt; verglichen mit dem Sinussignal beträgt der Abstand sogar bis

zu 80 dB! Typischerweise wird dieser Abstand sogar noch größer sein, da meist eher auf CISPR-Klasse 5 oder sogar noch strenger geprüft wird.

Auf der einen Seite bedeutet dieser Vergleich, dass mit der bisher verwendeten Messmethodik einschließlich den definierten Grenzwerten der störungsfreie Betrieb der Kommunikation sichergestellt sein sollte. Auf der anderen Seite zeigt der Vergleich aber auch, dass die Sicherheitsmarge extrem groß ist und damit die Anforderungen an einen Störer - zumindest in Bezug auf die Sicherstellung der digitalen Kommunikation in diesem Störszenario - letztlich zu streng sind, was dazu führen kann, dass eventuell aufwändige und teure Entstörmaßnahmen ergriffen werden müssen, um den vorgegebenen Grenzwert einzuhalten, ohne dass dies für den Schutz der Kommunikation notwendig wäre.

5 Vorschlag für eine neue Methode zur Bewertung von Störemissionen

Wie oben dargelegt, ist weder der Messempfänger noch die APD-Messung in der Lage, das Störpotenzial hinsichtlich der Kommunikationstrecke richtig zu bewerten, was einer technisch korrekten und aussagekräftigen Störbewertung entgegensteht und wodurch ggf. ein unnötiger Entstöraufwand generiert wird, der zur sicheren Kommunikation nicht notwendig ist. Auf Basis dieser Erkenntnis soll hier als *Diskussionsvorschlag* die Idee einer Emissionsmessmethode mit einem neuen Messsystem vorgestellt werden, die diese Lücke schließen könnte.

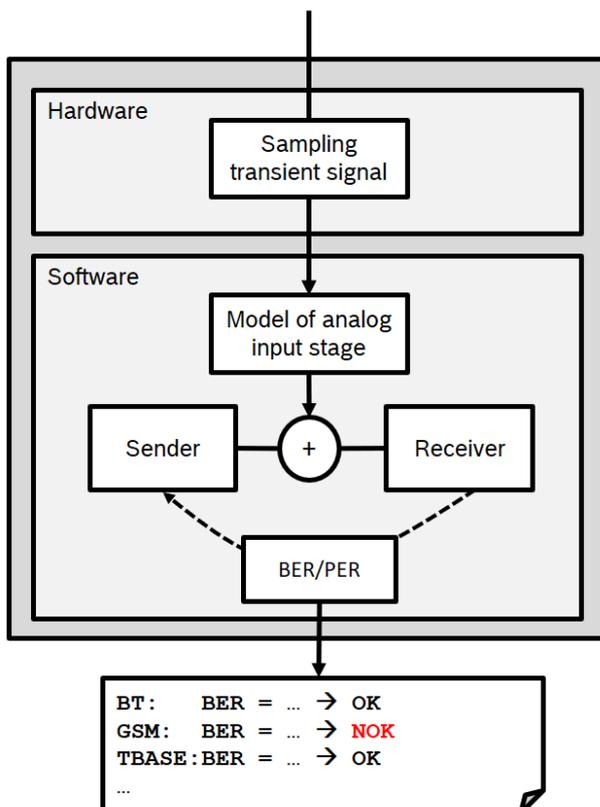


Bild 6 Blockschaltbild für ein vorgeschlagenes Messsystem

Der Messempfänger stellte in der Anfangszeit der EMV, wie schon erwähnt, eine realitätsnahe Nachbildung der wichtigsten Störsenken (schmalbandige, analoge

Empfänger für Rundfunk oder Funkdienste) dar. In direkter Analogie zu diesem Konzept bietet es sich an, eine Messmethode zu definieren, bei welcher das gemessene Störsignal bewertet wird, indem das Zeitsignal des Störers direkt auf Kommunikationsstrecken einwirkt.

Denkbar ist die Realisierung in einem Gerät, welches das transiente Zeitsignal der Störquellen aufzeichnet und dieses mit Hilfe geeigneter Software auf Modelle der verschiedenen zu schützenden Kommunikationssysteme koppelt, in denen realitätsnahe Protokolle (mit Kanalschätzverfahren, Fehlerkorrekturalgorithmen etc.) laufen, wie vereinfacht in Bild 6 dargestellt. Als Messergebnis könnte das Messgerät eine Bit- oder Paketfehlerrate ausgeben, welche unmittelbar die Wirkung der Störung auf die Qualität der Übertragung wiedergibt. Da dies in Software realisiert wäre, könnte so innerhalb von Sekunden ein Störer gegen viele verschiedene Kommunikationssysteme realitätsnah getestet und bewertet werden. Zukünftige neue Kommunikationssysteme könnten bei einem solchen Konzept ohne Hardwareänderungen rein durch entsprechende Modelle und Software ergänzt werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Am Beispiel des Automotive Ethernet wurde messtechnisch gezeigt, dass weder die klassische Messempfängermessung noch die APD in der Lage ist, das Störpotenzial von Signalen hinsichtlich der Störung einer Automotive Ethernet Kommunikation korrekt zu bewerten und beide Verfahren nur einen Kompromiss darstellen, wodurch bei vielen Störquellen ein unnötiger Entstöraufwand generiert werden kann.

Auf Basis dieser Erkenntnis wird eine neue Emissionsmessmethode vorgeschlagen, welche diese Lücke schließen könnte, da damit direkt der Einfluss der Störquelle auf die digitale Kommunikation bewertet werden wird und damit ein störsicherer Betrieb digitaler Kommunikationssystemen sichergestellt werden kann, ohne dass ein unnötig hoher Entstöraufwand erforderlich ist.

Literatur

- [1] International Special Committee on Radio Interference IEC: Technical Report, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, part 3. In: *CISPR/TR 16-3 technical reports, Edition 3.1* (2012-07)
- [2] K. Wiklundh: Relation between the amplitude probability distribution of an interfering signal and its impact on digital radio receivers. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (2006)