

## ▪ **Entstehung und Ausbreitung leitungsgeführter Störsignale im Kraftfahrzeug**

**Dipl.-Ing. Martin Kull**

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
1. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Landstorfer
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung:	08.11.2007

Moderne Fahrzeuge besitzen eine große Zahl von elektrischen und elektronischen Verbrauchern, die in sämtlichen Bereichen des Fahrzeugs zum Einsatz kommen. Elektronik findet man bei Komfortfunktionen (Sitzverstellung, Fensterheber, Klimaanlage,...), bei der Antriebssteuerung (Motor- und Getriebesteuerung,...), im Telematik- und Multimediabereich (Mobilfunk, Radio, Fernsehen, Navigation,...) sowie bei Sicherheitseinrichtungen (Anti-Blockier-System ABS, Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP, Airbag,...). Der Wandel in den letzten fünfzehn Jahren von einfachen, über Schalter und Relais gesteuerten Einzelverbrauchern zum vernetzten Fahrzeug, bei dem die Verbraucher untereinander kommunizieren können, brachte viele Vorteile für den Endverbraucher, also den Fahrer, der den Alltag dadurch komfortabler, sparsamer, umweltverträglicher und sicherer bewältigen kann.

Allerdings erfordert die steigende Zahl der elektrischen und elektronischen (e/e) Systeme auch immer aufwändigere Prüfungen und Untersuchungen, um einen fehlerfreien Betrieb gewährleisten zu können. Seit einigen Jahren lassen Meldungen in sämtlichen Medien den Eindruck aufkommen, dass die komplexe Elektronik der Fahrzeuge durch die Hersteller nicht mehr ausreichend beherrscht wird – und das, obwohl gleichzeitig Statistiken heutigen Fahrzeugen eine höhere Zuverlässigkeit bescheinigen.

Typischerweise werden die Systeme im EMV-Bereich (Elektromagnetische Verträglichkeit) zahlreichen Prüfungen unterzogen. Ein wesentlicher Teil dieser Tests beurteilt feldgebundene Störgrößen. Die elektrische Feldstärke dient als Maß bei der Untersuchung der Störfestigkeit und der Störaussendung eines Gerätes. Ebenso kommt die Funkstörspannung, gemessen am Anschluss einer Antenne oder an Netznachbildungen, zum Einsatz. Störspannungen oder -ströme auf Leitungen werden mit Koppelzangen gemessen, oder es wird die Störfestigkeit durch Einkopplung auf die Anschlussleitungen untersucht. All diese Prüfungen werden normalerweise im Frequenzbereich durchgeführt.

Der größte Teil der Untersuchungen, der sich mit der Störaussendung eines Fahrzeugs im Frequenzbereich befasst, betrifft die Störung von Funkdiensten, die im Fahrzeug und in seiner Umgebung genutzt werden. Denkbare Störungen sind Pfeifen und Knacken im Radio oder Sprechfunk oder Bildstörungen im Fernsehen.

Bei Störfestigkeitsprüfungen im Frequenzbereich ist der umgekehrte Weg von Bedeutung. Hier werden Störungen durch externe Sender von Rundfunk, Fernsehen,

Sprechfunk, Mobilfunk und anderen Sendern nachgebildet, indem ein möglichst großer Frequenzbereich in kleinen Schritten von wenigen Kilohertz bis zu einigen Megahertz überstrichen wird, wobei bei jeder Prüffrequenz eine gewisse Zeit eingestrahlt wird.

Im Gegensatz dazu beschäftigen sich Prüfungen mit Impulsen auf den Zuleitungen der Verbraucher hauptsächlich mit dem sicheren und zuverlässigen Betrieb des Fahrzeugs unter dem Einfluss der vom Fahrzeug selbst generierten Störungen. Die Prüfimpulse sollen möglichst alle im Fahrzeug auf dem Kabelbaum auftretenden Störungen nachbilden, die zum Beispiel beim Schalten von Relais, durch den Betrieb von Elektromotoren oder durch bestimmte Fehler im Bordnetz entstehen und aufgrund ihrer Charakteristik zu Störungen der Bordelektronik führen können. Die entscheidende Einschränkung dieser Prüfungen ist die ausschließliche Ausbreitung der Impulse auf den Leitungen.

Durch die stetige Weiterentwicklung sind in den letzten Jahren Verbraucher mit zusätzlichen Störpotentialen hinzu gekommen, die es zum Zeitpunkt der Festlegung der bisherigen Prüfimpulse in der heutigen Form nach DIN 40839 oder ISO 7637 im Jahre 1990 noch nicht gab. Die Prüfimpulse und -aufbauten dieser oder ähnlicher Herstellernormen werden demnach seit dieser Zeit praktisch unverändert für die Prüfungen eingesetzt.

Heute findet man zwei bedeutende neue Kategorien von Störern in Fahrzeugen. Die erste Gruppe beinhaltet zahlreiche PWM-Signale (Puls-Weiten-Modulation) zur Leistungsregelung von Antrieben (Lüfter, Fensterheber, usw.) oder zur Steuerung der Heizleistung bei Sitz- oder Scheibenheizungen. Diese Signale verursachen zwar meist Störungen mit geringen Amplituden auf den Leitungen des Bordnetzes, aber durch ihre Regelmäßigkeit ist ebenfalls ein gewisses Störpotential gegeben.

Xenon-Scheinwerfer gehören zur zweiten Gruppe „neuer Störer“, obwohl sie bereits seit einigen Jahren verwendet werden. Die Hupe hat eine ähnliche Charakteristik, was die ausgesendeten Störungen betrifft und wird deshalb ebenso dieser Gruppe zugeteilt. Das Störpotential dieser „neuen“ Störer liegt nicht unbedingt in der Impulsform begründet, da diese den Burst-Impulsen nach ISO 7637 sehr ähnlich ist. Es ist vielmehr die Neuartigkeit der Verbraucher, die immer mehr aus einer Kombination aus empfindlichen Kontroll- und Kommunikationsschaltkreisen und Leistungselektronik-Baugruppen besteht, die auf der gleichen Platine - oder zumindest im gleichen Gehäuse - untergebracht sind. Teilweise sind diese Baugruppen auch durch Leitungen voneinander getrennt, was eine Abstrahlung oder Einkopplung von Störsignalen auf ganze Systeme ermöglicht, was durch keine der bisherigen Prüfungen abgedeckt wird.

Die vorliegende Arbeit erfasst einen großen Teil der in heutigen Fahrzeugen verbauten Verbraucher und kategorisiert diese bezüglich verschiedener Kriterien wie Zugehörigkeit zu Standardprüfimpulsen oder zu Gruppen neuer Störer. Zahlreiche Messungen an mehreren unterschiedlichen modernen Fahrzeugen, unter anderem auch an 42 V-Bordnetzkomponenten zukünftiger Fahrzeuggenerationen, dienen als

Grundlage dieser Einteilung. Der „Impulskatalog“ soll dem Fahrzeughersteller einen umfassenden Überblick über die Störquellen geben und als Grundlage bei der Entwicklung dienen. Zusätzlich werden auch Erkenntnisse über die Ausbreitung der Impulse auf dem Kabelbaum beschrieben, die bei Neuentwicklungen zur Vorhersage des Störpotentials genutzt werden können. Berechnungen dazu können mit einfachen Spice-Simulationsmodellen durchgeführt werden. Zwei dieser Modelle für aktuelle Fahrzeuge werden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt, wobei die Ergebnisse auch ohne großen Aufwand auf Neuentwicklungen übertragen werden können, da hier nicht der genaue Störpegel gesucht wird, sondern die grundsätzliche Ausbreitungsfähigkeit einer Störung geklärt werden soll.

Da die bisherigen Prüfimpulse nach ISO 7637 auf grundlegenden Erscheinungen beruhen, decken diese noch den größten Teil der bei den Messungen aufgetretenen Impulse ab. Neu hinzugekommene Störer (Xenon-Licht, PWM-Signale), neue Ausbreitungswege und neue Kopplungsmechanismen sollten jedoch in Zukunft bei diesen Prüfungen berücksichtigt werden. Wichtige Merkmale dieser Erscheinungen werden deshalb in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Ergänzt werden diese Daten mit Vorschlägen für Prüfaufbauten und die Erzeugung dieser neuen Prüfimpulse und allgemeinen Regeln, die bei Messungen – speziell im Kfz-Bereich – beachtet werden müssen, um zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Basierend auf den bei den Messungen gewonnenen Erfahrungen wird die Entwicklung und der Aufbau eines für den Kfz-Bereich optimierten Messsystems beschrieben, welches den Ablauf von EMV-Untersuchungen vereinfachen und beschleunigen kann. Durch die potentialfreie und störteste Messwerterfassung und -übertragung werden mögliche Fehlerquellen beim Messaufbau reduziert. Die größere Zahl an Eingangskanälen reduziert die Messzeit im Vergleich zu Messungen mit üblichen Digitalspeicheroszilloskopen und die teilweise automatische Auswertung sowie die einfache Datenübergabe an andere Computer verringern ebenfalls den Aufwand bei der Entwicklung und Überprüfung der Fahrzeugelektronik.

## ■ **Generation and Propagation of Conducted Disturbances in Motor Vehicles**

**Dipl.-Ing. Martin Kull**

Modern passenger cars are equipped with a lot of electric and electronic devices which are used for many different purposes. There are comfort functions like power windows, power seats, air condition, power train systems (engine and gearbox control), telematics, multimedia and safety systems like Radio, TV, Navigation, Anti-Blocking System ABS, Electronic Stability Program ESP or Airbags. Many formerly mechanical functions are replaced by electric systems with high power demands.

The last 10 to 20 years brought an enormous progress from simple electric drives, heatings or lights which were operated by mechanical relays and switches to modern electronic systems connected by networks. This process made the handling of vehicles easier, safer and far more comfortable. As a result of this development a lot of new problems emerged however which should be eliminated before production is initiated. Customers generally do not accept bugs in the electronic systems.

Many reports in the media showed that not all faults have been found early enough, whereas studies discovered that today's cars are more reliable.

All electric and electronic systems are tested in EMC labs before they are built into a car. Many tests are applied in the frequency domain. They ensure that a device does not disturb external or internal receivers for TV or radio or other broadcasting systems. Additionally, the devices must withstand high external electromagnetic fields, generated by radio or TV stations or mobile phones and their base stations. Most of these tests cover the undisturbed function of transmission of signals through the air.

Another important part of the tests are the test pulses for automotive devices described in [ISO7637] or comparable standards of automotive manufacturers. The devices must not create pulses higher than those specified in these standards and the devices have to work without failure during the application of the test pulses. The main difference to the tests in the frequency domain is that the pulses are generated in a car and only disturb the systems of the same car. There is no interaction with other vehicles or other electric or electronic systems.

Technological progress brought a lot of new devices with a totally different behavior into cars. The tests in the frequency domain are still valid for these devices, because a TV or radio station still sends in the same manner as it did 20 years ago. New external sources of disturbances like cellphones or digital broadcasting systems lead to new tests with pulse modulated signals, but disturbing pulses created by the car itself were not investigated that intensively in the last few years.

These changes led to the main question: Are there any new phenomena which are not covered by the more than fifteen year old test pulses?

### **Measurement of fast transients**

The first step in the present study is the measurement of all transient signals generated by electric and electronic devices in four different cars. Three of them are of the same type but with different configurations (different engines, different years of construction, one car with 12 V and 42 V supply system). The fourth car has a two-battery supply system with two independent 12 V batteries.

The measurements show that the amplitudes of the pulses of the devices at their connectors to the wiring harness are clearly lower than allowed by the standards of the automotive manufacturers. Higher levels occur only in the 42 V prototype, but the development of this device is not yet completed. This means there is a sufficient safety margin between the test pulses and the real disturbances. Exceptions are

battery faults and the moment the engine is started. Real pulses of these two types of signals look almost the same in the whole car and have the same levels as the test pulses. These are very slow actions and no damping occurs on the lines of the wiring harness. The amplitudes of faster transients are reduced by the impedance of the lines and by capacitors connected to the supply lines. Most of the measured pulses are covered by the ISO-test-pulses if amplitudes and rise times are considered.

Two new groups of signals were found. First there are a lot of pulse width modulated signals (PWM) in today's cars. They are used for heatings, power supplies and power control of electric drives. The amplitudes and frequencies of these signals are in the range of the ripple on the supply lines caused by the generator. Some signals have a wider frequency spectrum because of the rectangular or trapezoidal shape of the pulses compared to the rectified sinusoidal shape of the output signal of the generator. The second group of new signals includes the horns and Xenon-lights. They generate very fast transients with the shape of damped sinus signals. The frequencies or rise times are similar to the burst signals of ISO 7637 and are influenced by the length of the supply lines and the impedances connected to the lines. These pulses cannot be handled as an exception any more, as it was once done with the horns, as they cause some problems in spite of their similarity to the burst signals.

All "old" and "new" pulses can be generated with today's arbitrary generators and pulse amplifiers, which are already in use in most EMC labs. Only some software modifications are necessary to get the new pulses.

However, as the measurements show that none of the "new" pulses differ too much from the known test pulses, there must be another effect that leads to malfunctions in successfully tested devices. The main problem while testing new devices with old tests is the missing of an adequate environment to the device under test. Only parts of the wiring harness are used. The impedance of the lines and the power source differ from the real situation in a car although it is in accordance with the standard. In addition, the communication on the network connections is not comparable to a real car in operation with its uncountable amount of different states. All these limitations lead to an insufficient test of the devices during development.

### **Impedances and simulation of the wiring harness**

The second part of this work is the investigation of the impedances and capacitances at the supply lines to get an overview of the properties of the wiring harness and to get data for a simple simulation circuit of this part of the electric system of a car.

The high capacitances at the supply lines of 20 to 50 mF in a modern car of the upper class help to reduce the propagation of fast transients compared to former vehicles. The high values result mainly from the high number of electric and electronic devices and their input filter networks. The advantage of the high capacitances is relativised a little bit by the shorter distances between the devices and their great number. The battery also helps to reduce the voltage ripple on the supply lines by a factor of about two compared to the disconnected battery when the

system is powered by the generator only. The influence of the battery is mainly in the lower frequency range up to 100 kHz where the ripple voltage caused by the generator and pulse modulated signals form the main part of the disturbances.

For the measurements and calculations the supply system of each car is divided into five to seven subnetworks which can be separated in the real car by disconnecting some main lines or fuses. The parameters of these subnetworks are measured and calculated by the use of alternative values, if necessary. Capacitances, for example, cannot be measured directly, but they can be calculated from measured current and voltage signals when switching on the supply voltage. Simulation circuits for both types of cars investigated in this work are developed. These models can be used for the calculation of inrush currents and pulse propagation on the main supply lines. The knowledge of the inrush currents becomes important as today's cars get more and more power switches for parts of the harness in order to shut down the supply voltage of unused devices when the car is parked. These switches have to handle currents up to 500 A and it is necessary to have an indication for this value at an early design stage. The simulation models are easy to handle and can be adapted to new developments without effort because they represent only the main lines in detail. All other lines and devices are combined to a lower number of capacitors and the appropriate lines.

The simple simulation circuits are tested by a comparison of their results with the measurement results. Especially at lower frequencies up to 1 MHz or rise times of 1  $\mu$ s or slower the calculated results were acceptably good and the propagation of transients on the main lines of the wiring harness can be predicted sufficiently accurate. Faster pulses show a higher attenuation at the calculations than at measurements in a car. This comes from the missing capacitive and inductive coupling between the lines and from the missing direct coupling of fast transients to the measuring cables in the simulation circuit.

### **New potential free multi-channel measuring system with high immunity level**

In addition to these investigations a third part of this work deals with the development and production of a new measuring system, optimized for automotive EMC tests.

Most of the signals and pulses that occur in a modern passenger car are in the range of millivolts up to some hundreds of volts at rise times and durations of nanoseconds up to seconds or minutes. Furthermore, there are currents of milliamps up to hundreds of amps. All of these signals can be measured with standard digital storage oscilloscopes (DSOs). Current probes or shunt resistors have to be used for the measurement of currents. Some limitations of DSOs impede their unrestricted use during EMC tests. First, none of the commercial devices can handle field strengths of some hundreds of volts per meter without failures or damages. Secondly, the number of input channels is in most cases limited to four and all of the inputs use a common ground potential – this generally prevents the use of shunt resistors. The third limitation is based on the fact that only one channel can be used as a trigger source. This means that a signal is only captured properly if the user has chosen the correct

trigger source before the measurement started. This is almost impossible if an unknown source of interference should be found.

All of these restrictions can be neglected by the newly developed measuring system. There are eight input channels in the standard configuration. All of them can be used as a trigger source at the same time. The system consists of four transmitters with two inputs and one digital or four analog receivers. The two inputs of each transmitter use the same ground potential, but the transmitters and the receiver(s) are potential free among each other. The battery powered transmitters digitize analog signals in the range of DC to about 10 MHz, which is sufficient for many applications. Then the signal is serialized and transmitted to the receiver by an optical fiber. The upper frequency limit is given by the fastest digital I/O-board for standard personal computers available at the moment, which can handle data rates up to 65 MS/s for each of the eight input channels. The digital receiver is based on a small PC with a built-in digital I/O board for the storage and analysis of the data. An internal hard disk enables the storage of thousands of measurements. Serial, USB, network and Firewire interfaces make it easy to share the data with colleagues. The 12V power supply allows an easy mobile use of the system, even during test drives. If eight input channels are not enough, the system can be extended to 16 or more channels by using two or more digital I/O-boards and the appropriate number of transmitters.

Analog receivers can be used to retrieve the signal of the transmitter input for further use outside the EMC test chamber. A system of transmitter and analog receiver (optical link) can achieve analog bandwidths of up to 50 MHz with today's technologies at reasonable costs and according to the demands on mobile use. All of the new devices are built into shielded housings and can be used at high field strengths almost without any limitations. An important feature of the transmitters to achieve this, is the use of internal and external low pass filters at the inputs. These filters are necessary as anti-aliasing filters for the analog to digital conversion and to prevent the inputs from being damaged by the extremely high voltages on the lines that occur during EMC tests. A wide range of filters between 100 kHz and 50 MHz with low reaction to the device under test has been developed to get the best adaptation to all measurement situations.

Comparisons between measurements with DSOs, the new test system and the faster optical links show that the new potential free measuring systems can help to reduce measuring errors caused by the setup. The influence of the measuring system on the device under test is much lower due to the shorter measuring cables and the potential free optical transmission. The coupling of fast transients into the cables is reduced and as a result of the missing common ground there are no equalizing currents on the shielding of the measuring cables caused by the voltage drop on the body of the car. Due to the potential free optical link, shunt resistors for the measurement of currents can be used very easily as well.

## **Conclusion**

The measurements show that all pulses and signals that occur in modern passenger cars do not differ significantly from the well-known test pulses of [ISO7637] or other standards of the automotive industry. Modern test pulse generators can be adapted easily to all shapes of pulses discovered during the measurements. The bigger problem is the definition of an adequate test setup that provides a “real world” environment for the device under test with the same impedances and the same data traffic as the device is faced with in a real car.

Additional investigations and an exchange of experiences between different companies are necessary to gather enough data for a new definition of the test parameters. Some parameters like inrush currents or the propagation of “new” pulses can be calculated by the use of simple simulation circuits. This can be done at an early design stage and helps to pre-estimate the influence of new devices on the electric system of a car.

Furthermore, the newly developed multi-channel measuring system and optical links simplify measurements during EMC tests. They are used to reduce measuring errors and allow measurements at high disturbance levels.