

Schnelle Emissionsmessung im Zeitbereich als zeitsparende Alternative

C. Keller, K. Feser

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

1 Einleitung

Die für die EMV-Prüfung eines Gerätes vorgeschriebenen Emissionsmessungen müssen nach den geltenden Normen im Frequenzbereich z.B. mit Hilfe eines Messempfängers durchgeführt werden. Diese Messmethode hat den Nachteil, dass die Messung je nach Wahl der Parameter lange dauert (typisch 10 - 30 min). Da lange Messzeiten stets hohe Kosten bedeuten, wird nach Möglichkeiten gesucht, die Messungen bei gleichbleibender Qualität zu verkürzen.

Hier bietet sich insbesondere die Messung im Zeitbereich an. Anstatt mit dem Messempfänger werden mit einem Oszilloskop einige kurze Zeitverläufe (Größenordnung μs) aufgezeichnet. Aus diesen Daten wird mit der Diskreten Fourier-Transformation DFT und verschiedenen Algorithmen ein vergleichbares Spektrum berechnet. Je nach Art des Messsignals ergibt sich so eine Beschleunigung um den Faktor 10 – 100. Es wurde dafür das Programm „FEMIT“ (Fast Emission Measurement In Time Domain) entwickelt, mit dem komfortabel Messungen durchgeführt und die Daten ausgewertet werden können.

Die einzelnen Teilaspekte und theoretischen Hintergründe des Messsystems wurden schon in verschiedenen Veröffentlichungen vorgestellt [1], [2], [3], [4], [5]. In diesem Artikel soll das Gesamtsystem im Überblick dargestellt werden und die für die Anwendung interessanten Punkte, wie beispielsweise die Signalerkennung, beleuchtet werden.

2 Überblick

2.1 Messsystem

Der Aufbau des Messsystems im Vergleich zum Messempfänger ist in Bild 1 dargestellt. Der Kern ist ein Digitaloszilloskop, dem ein Anti-Aliasing-Tiefpass und, je nach Pegel des Eingangssignals, ein Vorverstärker vorgeschaltet ist. Die Messdaten des Oszilloskops werden über den IEC-Bus an einen PC übertragen. Die Steuerung der Messgeräte sowie die Berechnung und Darstellung der Ergebnisse wird von dem Programm FEMIT vorgenommen. Die Anforderungen an das Oszilloskop werden durch den gewünschten Frequenzbereich vorgegeben: die Samplingfrequenz sollte ungefähr dem Vierfachen der höchsten Messfrequenz entsprechen.

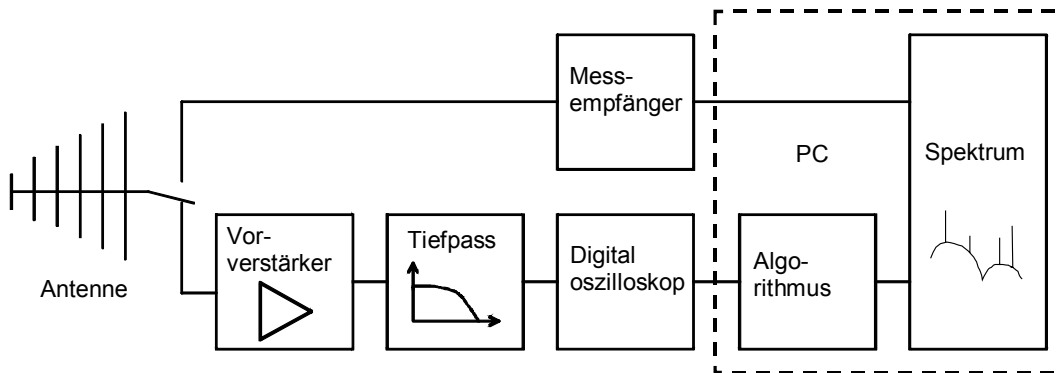


Bild 1: Aufbau und Komponenten des Messsystems FEMIT

2.2 Prinzip

Beim derzeitigen Stand der Technik ist es mit handelsüblichen Messgeräten aus Gründen der Rechenzeit und des Speicherbedarfs nicht möglich, das Messsignal kontinuierlich zu erfassen und beispielsweise mit Hilfe von digitalen Filtern den Messempfänger nachzubilden.

Daher können nur einzelne, vergleichsweise kurze Messungen aufgezeichnet werden. Um trotzdem das Spektrum korrekt berechnen zu können, kommt es darauf an, diejenigen Ausschnitte des Zeitsignals zu erfassen, welche die charakteristischen Anteile des Spektrums enthalten. Aus den entsprechenden Teilspektren der einzelnen Zeitsignale wird durch Überlagerung im Frequenzbereich mit Hilfe verschiedener Algorithmen das gesuchte Spektrum berechnet.

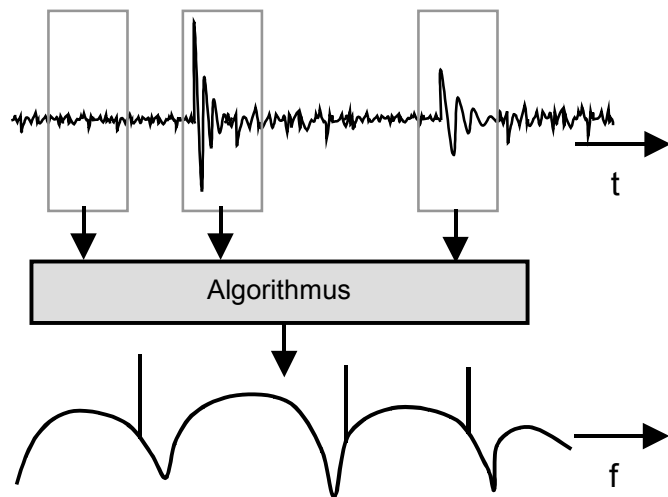


Bild 2: Grundprinzip des Messsystems FEMIT

2.3 Zeitvorteil

Der gesamte Messablauf einschließlich Berechnung dauert je nach gewünschter Genauigkeit und Art des Messsignals 5 – 30 s. Verglichen mit der Messzeit des Messempfängers, die je nach Detektor im Bereich von Minuten bis Stunden liegt, ergibt sich hier ein Zeitvorteil von ungefähr Faktor 10 – 100! Über die Hälfte der insgesamt benötigten Zeit wird derzeit für die Übertragung der Daten vom

Oszilloskop zum PC benötigt. Bei einer (technisch möglichen) Integration der Software in das Digitaloszilloskop würde sich die Messzeit weiter deutlich reduzieren lassen.

2.4 Anwendungen

Für das Messsystem sind vielfältige Anwendungen denkbar. Es bietet sich besonders an für:

- Vor- und Übersichtsmessungen
- Entwicklungsbegleitende Messungen
- Bestimmung der Richtung der höchsten Abstrahlung und Höhengscan
- Kontrolle von Entstörungsmaßnahmen
- Messung einmaliger Phänomene (z.B. Schaltvorgänge)

2.5 Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- Genauigkeit der Geräte:
Der Messfehler der Geräte selbst liegt bei < 1 dB und kann daher im Rahmen der insgesamt erreichten Messgenauigkeit vernachlässigt werden.
- Genauigkeit der Algorithmen:
Durch die Verwendung der DFT ist ein mathematisch einwandfreier Zusammenhang zwischen der Frequenz- und Zeitbereichsdarstellung gegeben. Somit herrscht insbesondere bei Schmalbandsignalen vollkommene Übereinstimmung. Auch ein regelmäßiger Puls kann für alle Detektoren korrekt gemessen werden. Erst bei der Überlagerung von mehreren Spektren können bedingt durch Näherungen in den Algorithmen Fehler bis ca. 1 dB auftreten.
- Einfluss des Messsignals:
Das Messsignal selber kann das Ergebnis beeinflussen. Prinzipiell können zwei Ursachen dafür vorliegen.
 - a.) Oft sind die Signale nicht konstant, sondern einer gewissen Schwankung unterworfen. Da das Messsystem FEMIT systembedingt das Spektrum nur aufgrund weniger stichprobenartiger Messungen berechnet, können solche Schwankungen zu Abweichungen von der Messempfänger-Messung führen. Es ist jedoch zu beachten, dass je nach Umfang der Schwankungen dies auch bei Messempfänger-Messungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann.
 - b.) Bei FEMIT können neben dem Schmalbandanteil zwei bis drei verschiedene Pulse gemessen und berücksichtigt werden. Wenn mehr Pulse vorhanden sind, die alle das Spektrum in verschiedenen Frequenzbereichen dominieren, kann es zu Fehlern kommen. Der praktische Einsatz zeigt jedoch, dass solche Verhältnisse sehr selten auftreten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in erster Linie die Art des Messsignals selbst entscheidend für die Genauigkeit des Ergebnisses ist.

In Tabelle 1 werden die in der Praxis typischerweise auftretenden maximalen Abweichungen von der als Referenz betrachteten Messempfänger-Messung aufgelistet.

Signaltyp	Typ. max. Fehler
Schmalbandsignal	< 1 dB
Regelmäßiger Puls	< 2 dB
Überlagerung von Pulsen	< 3 dB
Stochastische Signale	< 5 dB

Tabelle 1: Typischer maximaler Fehler des Messsystems FEMIT

2.6 Rauschen und SNR

Der theoretisch maximal erreichbare Signal-zu-Rauschabstand (SNR) ergibt sich aus der Bitbreite des Digitaloszilloskops und der Anzahl der verwendeten Punkte für die Fouriertransformation. Das SNR in der Praxis ist stets etwas geringer und beträgt hier ungefähr 70 - 75 dB [3]. Dies stellt einen ausreichenden Wert dar.

Der Rauschpegel hängt neben der Bitbreite von dem gewählten Messbereich und dem verwendeten Vorverstärker ab. Mit Vorverstärker (25 dB) befindet er sich für gestrahlte Messungen bei < 10 dB μ V/m, ohne Vorverstärker bei < 30 dB μ V/m [3]. Beide Werte befinden sich deutlich unterhalb der gängigen Grenzwerte.

3 Grundalgorithmen

3.1 Unterscheidung Schmalband- und Breitbandsignal

Die bei einer Emissionsmessung auftretenden Signaltypen können in schmal- und breitbandige Signale eingeteilt werden. Zu den schmalbandigen Signalen gehören Sinusschwingungen diskreter Frequenz und periodische Impulse mit einer Wiederholfrequenz größer als die System-Bandbreite. Periodische Impulse mit geringerer Wiederholfrequenz sowie nichtperiodische Impulse sind als breitbandige Signale einzustufen. Im Zeitbereich können die beiden Signaltypen bei der in FEMIT gewählten Messzeit einfach unterschieden werden: wenn nur ein Puls im Messfenster erkennbar ist, handelt es sich um ein breitbandiges Signal, wenn mehrere oder keine erkennbar sind um ein schmalbandiges Signal [1].

Die Unterscheidung in die beiden genannten Signaltypen ist in FEMIT notwendig, weil diese mit unterschiedlichen Algorithmen behandelt werden müssen. Der Grund hierfür ist, dass die für Schmalbandsignale geltende Linearität für Breitbandsignale nicht mehr gültig ist, weil die Detektoren des Messempfängers breitbandige Signale nichtlinear dämpfen [1].

3.2 Wahl der Parameter

Für die Zeitbereichsmessung müssen zwei Parameter festgelegt werden: Samplingfrequenz und Fensterbreite [1]. Die Samplingfrequenz sollte, um Aliasing-Fehler zu vermeiden, mindestens der vierfachen maximal gewünschten Frequenz entsprechen. Die Fensterbreite sollte möglichst nah dem Kehrwert der Zwischenfrequenz-Bandbreite des Messempfängers liegen. Bei einer Bandbreite von 120 kHz wird beispielsweise 10 μ s gewählt.

3.3 Grundalgorithmus für Schmalbandsignale

Für die Messung eines Schmalbandsignals wird mit dem Oszilloskop eine Messung aufgezeichnet und mit Hilfe der DFT in ein Spektrum umgerechnet. Anschließend wird eine Leakage-Korrektur durchgeführt. Diese Maßnahme ist notwendig, um die systemtheoretisch bedingte zu niedrige Wiedergabe von Schmalband-Peaks, die zwischen Frequenzstellen der DFT liegen, zu korrigieren [2].

3.4 Grundalgorithmus für Breitbandsignale

Zur Messung eines Breitbandspektrums wird der zugehörige Puls aufgezeichnet und in ein Spektrum umgerechnet. Bei Breitbandspektren muss die nicht-lineare Dämpfung der Detektoren berücksichtigt werden. Die entsprechende Dämpfung hängt von dem gewählten Detektor, der Wiederholfrequenz des Pulses, der Systembandbreite und der Messzeit ab. Bild 3 zeigt die Korrekturkurven für Band C und D. Zur Korrektur wird das gesamte Spektrum für alle Frequenzen um diesen Wert gedämpft [1].

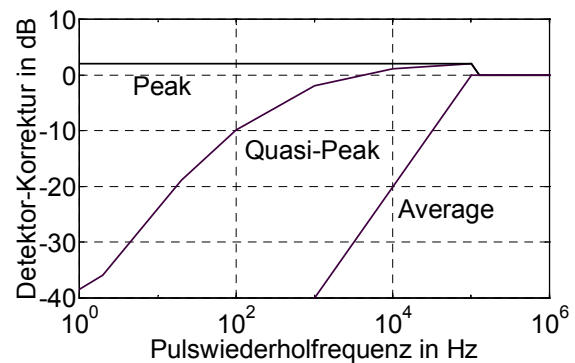


Bild 3: Detektor-Korrekturkurve für Peak, Quasi-Peak und Average-Detektor (Band C und D: Bandbreite 120 kHz und Messzeit 10 μ s)

3.5 Frequenzgangkorrektur

Als letzter Verarbeitungsschritt muss stets eine Frequenzgangkorrektur vorgenommen werden. Hier werden frequenzabhängige Faktoren berücksichtigt, wie beispielsweise Antennenfaktorkurve, Kabeldämpfung, Antialiasing-Tiefpass, etc. Die Frequenzgang-Korrekturkurve kann sowohl auf rechnerischem Wege, wenn alle einzelnen Übertragungsfunktionen vorliegen, als auch auf messtechnischem Wege ermittelt werden. Im letzteren Fall wird ein Sinussignal für verschiedene Frequenzen zuerst dem als Referenz betrachteten Messempfänger und dann FEMIT zugeführt. Die Differenz der Messergebnisse entspricht dann der Frequenzgang-Korrekturkurve.

4 Überlagerung von Einzelspektren

Je nach Art des Messsignals müssen mehrere Einzelmessungen durchgeführt werden (z.B. eine Schmalband- und eine Breitbandmessung) und die Teilspektren überlagert werden. Grundsätzlich sind drei Kombinationen möglich:

4.1 Überlagerung von Schmalbandspektren

Mehrere Schmalbandspektren zu überlagern ist dann nötig, wenn langsame amplitudenmodulierte Signale vorhanden sind. In diesem Fall ist die Periodendauer der Modulation deutlich länger als die Messdauer und daher das Messergebnis von der Phasenlage des Modulationssignals abhängig. Statistische Überlegungen führen zu dem Ergebnis, dass die Überlagerung von fünf Einzelspektren zu einer ausreichenden Genauigkeit führt [3].

4.2 Überlagerung von Schmal- und Breitbandspektrum

Wenn ein Schmalband- und ein Breitbandspektrum überlagert werden, muss an den Frequenzstellen, wo die beiden Teilspektren ähnlich große Pegel aufweisen, eine Überhöhungskorrektur berücksichtigt werden. Dadurch wird die bis zu 6 dB betragende konstruktive Interferenz der Zeitsignale bei gleicher Phasenlage korrigiert, die in den getrennt aufgezeichneten Teilsignalen nicht erkennbar ist.

4.3 Überlagerung von Breitbandspektren

Teilweise setzt sich das Messsignal aus mehreren verschiedenen Pulsfolgen zusammen. In diesem Fall wird von jedem Puls nach der beschriebenen Vorgehensweise ein Teilspektrum ermittelt. Diese Teilspektren werden dann paarweise überlagert, wobei für jeden Detektor eine andere Überlagerungsfunktion abhängig von den Pegeln der Teilspektren gilt [4].

5 Gesamtablauf

5.1 Messabläufe

Wie schon angedeutet, ist der anzuwendende Messablauf bedingt durch die Art des Messsignals. Grundsätzlich muss für jeden Signalanteil, der charakteristische Anteile für das Spektrum liefert, (mindestens) eine Messung durchgeführt werden und die sich ergebenden Teilspektren wie oben beschrieben überlagert werden. In FEMIT sind für alle relevanten Signalkombinationen entsprechende Messabläufe vordefiniert. Auf diese Weise können selbst Signale mit stochastischem Charakter (z.B. Bürstenfeuer eines Motors) gemessen werden [5].

5.2 Manuelle und automatische Signalerkennung

Vor der Messung muss eine Signalerkennung durchgeführt werden, um den richtigen Messablauf zu bestimmen. Hier existieren zwei Möglichkeiten: das Signal kann „manuell“ und automatisch analysiert werden. Bei der „manuellen“ Erkennung muss der Anwender selbst feststellen, wie sich das Signal zusammensetzt und den entsprechenden Ablauf auswählen. Die bequemere Möglichkeit ist dagegen die automatische Signalerkennung: hier wird der richtige Ablauf automatisch ermittelt.

Für eine automatische Signalerkennung gibt es verschiedene Möglichkeiten, die sich in Aufwand und Qualität unterscheiden. Eine sehr einfache, aber gut funktionierende Möglichkeit ist, das Signal aufgrund der Anzahl der Triggerereignisse bei unterschiedlichen Triggerschwellen auszuwerten. Hierbei wird die Triggerschwelle von 0 bis über das Signal hinaus nach und nach verschoben und bei jeder Schwelle die durchschnittliche Anzahl der Triggerereignisse gespeichert.

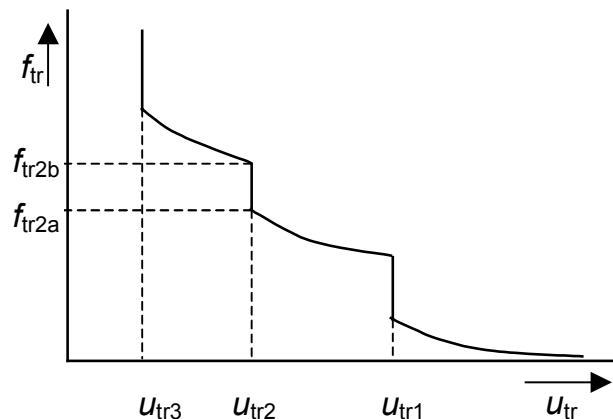


Bild 4: Durchschnittliche Triggerfrequenz f_{tr} als Funktion der Triggerschwelle u_{tr}

Aus der sich ergebenden Kurve, die wie in Bild 4 aussehen könnte, kann die Zusammensetzung des Signals rekonstruiert werden. Eine Stufe, wie in Bild 4 bei u_{tr2} , zeigt beispielsweise einen Puls an. Dessen Wiederholfrequenz ergibt sich aus der Höhe der Stufe, hier also $f_{tr2b} - f_{tr2a}$. Der Nachteil ist jedoch, dass die automatische Erkennung aus systemtheoretischen Gründen eine bestimmte Zeit in Anspruch nimmt. Wenn der Signaltyp bekannt ist (bei Wiederholungsmessungen beispielsweise ändert sich daran nichts), ist es daher sinnvoller, den Ablauf manuell auszuwählen.

6 Beispiele

In den folgenden Bildern sind für einige unterschiedliche Prüflinge die Messergebnisse von FEMIT und dem Messempfänger gegenübergestellt. Bild 5 zeigt das Spektrum eines PCs. Das Spektrum ist dominiert von Schmalbandsignalen, daher kann hier auf Messung des Breitbandanteils verzichtet werden. In Bild 6 ist das Spektrum eines Burstgenerators dargestellt. Dieses Signal zeigt einen sehr ausgeprägten Breitbandanteil, der im Zeitbereich den Pulsen der Burstpakete entspricht. Bild 7 und Bild 8 zeigen die Spektren von ausgesprochenen stochastischen Störern: eines Trennschleifers und einer Waschmaschine im Schleuderbetrieb. Bei allen Beispielen ist die Übereinstimmung der Ergebnisse des Messempfängers und von FEMIT im Rahmen der angegebenen Genauigkeit zu erkennen.

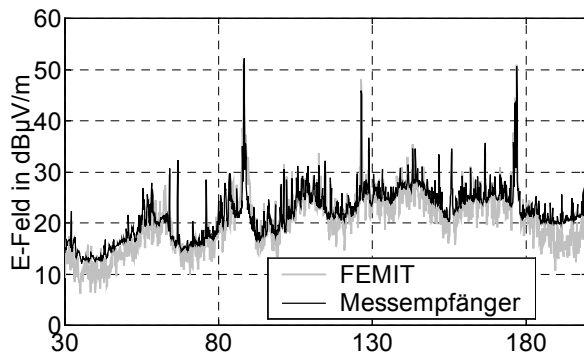


Bild 5: PC

Bild 7: Trennschleifer

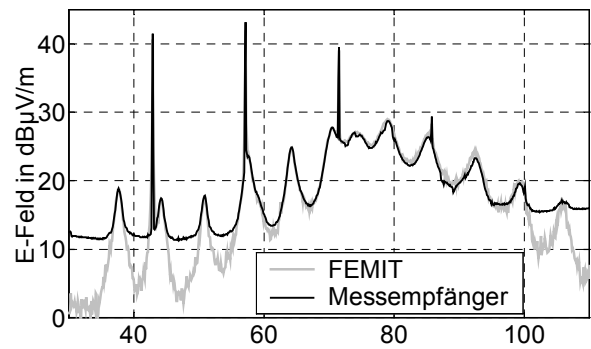
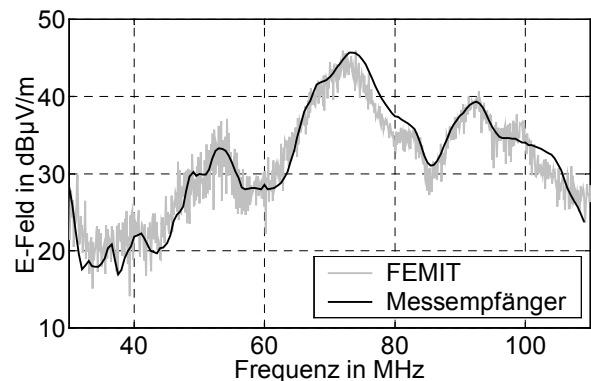
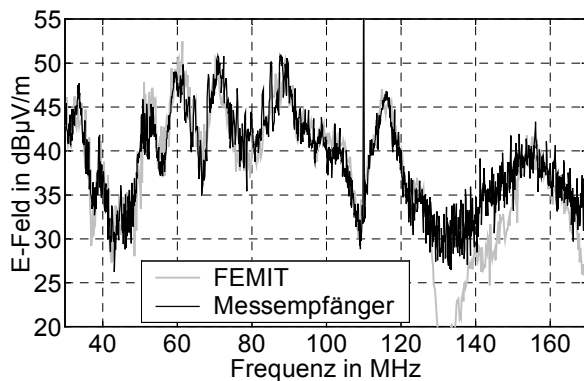


Bild 6: Burstgenerator

Bild 8: Waschmaschine



7 Zusammenfassung

Mit dem Messsystem FEMIT können EMV-Emissionsmessungen innerhalb einiger Sekunden durchgeführt werden. Damit entsteht ein erheblicher Zeitvorteil, der sich schnell auch als Kostenvorteil zeigt. Die Untersuchung aller wichtigen Eigenschaften des Messsystems, wie beispielsweise Genauigkeit, Rauschpegel und SNR, ergibt, dass FEMIT für viele Anwendungen eine lohnenswerte Alternative darstellt. Nicht zuletzt rückt durch die Tatsache, dass hierfür kein Messempfänger benötigt wird, sondern ein (meist schon vorhandenes) Oszilloskop ausreicht, die entwicklungs- begleitende EMV-Messung auch für kleinere Firmen in greifbare Nähe.

8 Literatur

- [1] C. Keller, K. Feser: Schnelle Emissionsmessung im Zeitbereich. EMV 2002, Düsseldorf
- [2] C. Keller, K. Feser: A new method of Emission Measurement. EMC 2002, Minneapolis
- [3] C. Keller, K. Feser: Improvements in the Fast Emission Measurement in Time Domain. EMC Europe 2002, Sorrento, Italy
- [4] C. Keller, K. Feser: Non-linear Superposition of Broadband Spectra for Fast Emission Measurements In Time Domain. EMC 2003, Zurich
- [5] C. Keller, K. Feser: Evaluation Of Stochastic Signals For Fast Emission Measurements In Time Domain. EMC 2003, St. Petersburg, Russia