

Wie geht es weiter mit der statistischen Auswertung der Funkstörungen von Seriengeräten? Das Projekt EN 50715

Dipl.-Ing. Frank Deter, Miele & Cie. KG, Werk Oelde, Deutschland
Prof. Wilhelm Kleppmann, Hochschule Aalen, Deutschland
Dipl.-Ing. Martin Egger, Bosch-Siemens Hausgeräte, Deutschland

1 Hintergrund, geschichtliche Entwicklung

Da eine 100%-Kontrolle der Funkentstörung von Geräten wegen des Zeitaufwandes nicht möglich ist, kann eine Bewertung der Konformität einer ganzen Serie nur mit Hilfe der Untersuchung einer begrenzten Stichprobe mittels statistischer Methoden erfolgen. Die Grundlagen dazu sind in CISPR TR 16-4-3 [1] zu finden.

Schon in den ersten CISPR-Normen zur Funkentstörung wurde folgendes zur Signifikanz eines CISPR-Grenzwertes festgelegt: „Die Bedeutung der Grenzwerte bei typgeprüften Geräten muss sein, dass auf statistischer Grundlage bei seriengefertigten Geräten mindestens 80% der Geräte mit einer Sicherheit von mindestens 80% die Grenzwerte einhalten.“ Umgangssprachlich wird das als 80/80-Regel bezeichnet.

Bei der Entwicklung der Grenzwerte wurde dies bereits berücksichtigt und die Grenzwerte entsprechend verschärft.

In CISPR TR 16-4-3 und den Produktnormen zur Funkentstörung wie CISPR 11, CISPR 14.1 und CISPR 15 wurden von Anfang an folgende Methoden verwendet:

- Prüfung auf der Basis der nichtzentralen t-Verteilung (allgemein 5 Geräte),
- Prüfung auf der Basis der Binomial-Verteilung (mindestens 7 Geräte).

Später wurde von den Autoren dieses Beitrags noch eine weitere Methode entwickelt und in die Normung aufgenommen, die in der Praxis besonders einfach anwendbar ist:

- Prüfung auf der Basis eines allgemeinen Abstands zum Grenzwert (allgemein 5 Geräte).

Alle 3 Methoden haben sich in der Praxis über viele Jahre bewährt.

2 Anwendungsbeispiele für die 80/80-Regel

Die Hauptanwendung der statistischen Beurteilung nach der 80/80-Regel ist natürlich die Beantwortung der Frage, ob eine große Serie von Produkten die Anforderungen an die Funkentstörung erfüllt. Man kann aber auch speziellere Fragen beantworten, auf die im Weiteren eingegangen wird.

2.1 Annahmewahrscheinlichkeit bei einer wiederholten Prüfung

Eine weitere Ergänzung zu CISPR TR 16-4-3 [1], die von den Autoren dieses Beitrags entwickelt wurde, beschreibt einfache Möglichkeiten, bereits in der Entwicklungsphase neuer Produkte zu berechnen, wieviel Abstand zum Grenzwert eingehalten werden sollte, um eine bestimmte Annahmewahrscheinlichkeit bei einer eventuellen späteren Marktüberwachung zu haben [3]. Dazu muss man für die Gerätegruppe aus vorhergehenden Erfahrungen einen Wert der Standardabweichung σ bei Funkstörmessungen schätzen und kann dann mit Hilfe eines Koeffizienten k_s bereits von den Messungen an einem einzelnen Prototyp eine Annahmewahrscheinlichkeit schätzen. Diese Koeffizienten k_s werden sowohl tabellarisch als auch grafisch dargestellt (siehe Bild1)

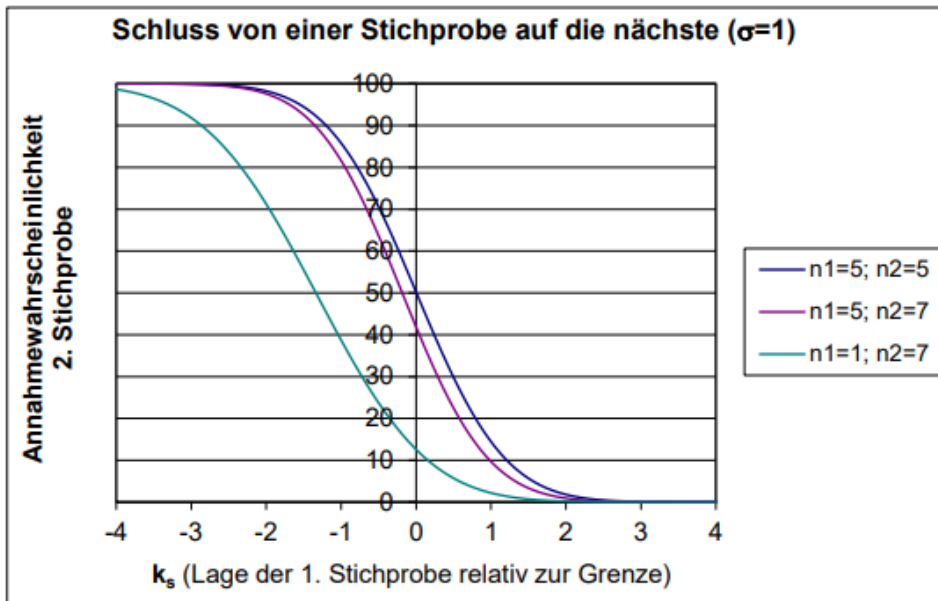


Bild 1: Grafische Darstellung der Koeffizienten k_s

Anwendungsbeispiel:

Der kleinste gemessene Abstand zum Grenzwert beträgt 4,5 dB, die geschätzte Standardabweichung $\sigma = 2,0$ dB (Erfahrungswert von ähnlichen Produkten). Als erstes muss der Abstand auf $\sigma = 1,0$ dB „normalisiert“ werden und beträgt dann nur noch 2,25 dB. Werte unter dem Grenzwert haben ein negatives Vorzeichen, also muss in der Grafik (siehe Bild 1) bei $k_s = -2,25$ abgelesen werden. Dazu verwendet man die Kurve „ $n_1=1; n_2=7$ “ – als erste „Stichprobe“ wird hier die Messung an dem einzelnen Prototyp angesehen.

In diesem Fall liegt die geschätzte Annahmewahrscheinlichkeit zwischen 75% und 80%. Ist der Hersteller mit diesem Wert nicht zufrieden, so muss er entweder Messungen an weiteren Geräten durchführen, um die Annahmewahrscheinlichkeit anhand der größeren Stichprobe genauer abschätzen zu können, oder sein Produkt verändern, um den Abstand zum Grenzwert zu erhöhen. Hat der Prototyp beispielsweise durchgehend 6 dB Abstand zum Grenzwert, ist die Annahmewahrscheinlich für eine wiederholte Prüfung bereits $> 90\%$.

Eine solche Abschätzung ist natürlich nur möglich, wenn auch für die zweite statistische Auswertung die 80/80-Regel verwendet wird.

2.2 Kompensation einer einzelnen Grenzwertüberschreitung

Interessant ist auch die Frage, ob eine einzelne Grenzwertüberschreitung in der weiteren statistischen Auswertung noch kompensiert werden kann.

Bei Anwendung der Binomialverteilung ist diese Frage einfach zu beantworten. Bei dieser Methode wird die Übereinstimmung mit den Anforderungen festgestellt, wenn die Anzahl der Geräte, deren Störpegel die zutreffenden Grenzwerte überschreitet, in einer Stichprobe von n Geräten nicht größer ist als der in Tabelle 1 angegebene Wert von c ist.

n	7	14	20	26	32
c	0	1	2	3	4

Tabelle 1: Anwendung der Binomialverteilung mit 80/80-Regel

Besteht ein Gerät nicht, müssen mindestens noch 13 weitere Geräte vermessen werden, wobei keine weitere Grenzwertüberschreitung auftreten darf.

Die Messung von 14 Geräten bedeutet allerdings einen erheblichen Aufwand. Deshalb erhebt sich die Frage, ob auch bei der üblichen Beurteilung mit 5 Geräten nach der nicht-zentralen t-Verteilung eine Grenzwertüberschreitung kompensiert werden kann. Die Forderung ist hier:

$$\bar{x} + kS_n \leq 0$$

wobei: \bar{x} Mittelwert des Abstandes zum Grenzwert
 $x_1 \dots x_5$ individueller Abstand zum Grenzwert von einem Gerät in der Stichprobe
 x ist positiv, wenn $>$ Grenzwert, negativ wenn $<$ Grenzwert
 k Faktor für die nicht-zentrale t-Verteilung, abhängig von der Anzahl der Geräte in der Stichprobe
 S_n Standardabweichung in der Stichprobe

Für $x_1 = 2$ dB bzw. $x_1 = 4$ dB $>$ Grenzwert ergibt sich entsprechend:

$X_1 = 2, X_2 \dots X_5 = -14$		$X_1 = 2, X_2 \dots X_5 = -15$	
\bar{x}	-10,80	\bar{x}	-11,60
S_n	7,16	S_n	7,60
$\bar{x} + kS_n$	0,08	$\bar{x} + kS_n$	-0,04
Result:	FAIL	Result:	PASS

$X_1 = 4, X_2 \dots X_5 = -29$		$X_1 = 4, X_2 \dots X_5 = -30$	
\bar{x}	-22,40	\bar{x}	-23,20
S_n	14,76	S_n	15,21
$\bar{x} + kS_n$	0,03	$\bar{x} + kS_n$	-0,09
Result:	FAIL	Result:	PASS

Um die Grenzwertüberschreitung zu kompensieren, müssen die nächsten Werte deutlich unter dem Grenzwert liegen. Dadurch steigt aber die Standardabweichung, welche noch mit dem Faktor k multipliziert wird. Man kann feststellen, dass es in der Praxis so gut wie unmöglich ist, bei Anwendung der nicht-zentralen t-Verteilung die statistische Prüfung zu bestehen, wenn eins der Geräte in der 5er Stichprobe eine Grenzwertüberschreitung ≥ 2 dB zeigt.

3 Konflikt mit der EU-Kommission – Kurzzeit- und Langzeit-Lösung

Im Jahr 2014 begann eine lange Diskussion zwischen CENELEC und der EU-Kommission, ob diese 80/80-Regel den rechtlichen Anforderungen an Normen entspricht, die unter der EMV-Richtlinie im Amtsblatt der EU gelistet werden sollen.

Dabei sehen einige Vertreter der EU-Kommission nur den ersten Teil der 80/80 Regel: „Was, nur 80% der Geräte müssen unter dem Grenzwert sein?“. Oftmals fehlt Juristen das Verständnis dafür, welche Einschränkung es bedeutet, auch den zweiten Teil der Regel einzuhalten, den statistischen Nachweis mit 80%iger Sicherheit.

Dabei ist es für die EU-Kommission unerheblich, ob die 80/80-Regel im normativen Teil oder in einem informativen Anhang enthalten ist.

Im Februar 2018 wurde letztlich ein Kompromiss zwischen CENELEC und der EU-Kommission vereinbart, der aus einer Kurzzeit- und einer Langzeit-Lösung bestand.

- Kurzzeitlösung:
 In den Anhängen ZZ zu den EN wird festgelegt, dass die 80/80-Regel nicht Bestandteil der Konformitätsvermutung ist.

- Langzeitlösung:
Es wird ein Leitfaden oder eine Norm entwickelt, in der die Anwendung der 80/80-Regel beschrieben wird. Dieses Dokument wird nicht zur Listung unter der EMV-Richtlinie vorgeschlagen. Aus den EN für Störemissionsmessungen wird danach durch sogenannte „common modifications“ jeder Verweis auf die 80/80-Regel entfernt.

Die „Kurzzeitlösung“ wurde nach einigen Verzögerungen im Jahr 2020 mittels eines A11 zu den europäischen Störemissionsnormen umgesetzt.

4 Entwicklung der Norm EN 50715 als Bestandteil der Langzeitlösung

Zur Umsetzung der Langzeitlösung bildete CENELEC TC 210 Juni 2018 eine neue WG 15 unter Leitung von F. Deter und startete das Projekt prEN 50715. WG 15 beschloss, eine Norm zu entwerfen, die auf CISPR TR 16-4-3 basiert, aber auch die Festlegungen für einzelne Produktgruppen enthalten soll, die bisher nur in den Normen EN 55011, EN 55014-1 und EN 55015 enthalten sind. Speziell sind das die Frequenzbereiche, in denen die statistische Beurteilung durchgeführt werden soll, wenn die Methode der nicht-zentralen t-Verteilung angewendet wird. Der Normentwurf prEN 50715 hat die CENELEC Enquiry mit einem positiven Ergebnis durchlaufen. Das ist äquivalent zu einem positiv abgestimmten CDV auf IEC-Ebene. Da aber in den Kommentaren auch technische Änderungen vorgeschlagen wurden, die zum Teil von der WG 15 angenommen wurden, gibt es als nächsten Schritt in CENELEC nochmal ein „Formal Vote“, äquivalent zu einem FDIS auf IEC-Ebene.

Eine Änderung betraf den Titel der Norm, der jetzt wie folgt lautet: „prEN 50715 - Statistical considerations in the determination of compliance for mass-produced products with requirements for unwanted radio frequency emission“. Damit sollte schon im Titel klargestellt werden, dass diese Norm nicht auf beabsichtigte Aussendungen angewendet werden soll. Im Weiteren ist die Norm an CISPR TR 16-4-3 [1] angelehnt und enthält folgende Abschnitte:

1. Scope
2. Normative references
3. Terms and definitions
4. Interpretation of CISPR radio disturbance limits
 - 4.1. Significance of a CISPR limit
 - 4.2. General (beschreibt den Unterschied in der Behandlung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Störungen)
 - 4.3. Compliance with limits in large scale production
 - 4.3.1. General
 - 4.3.2. Method based on a general margin to the limit
 - 4.3.3. Test based on the non-central t-distribution
 - 4.3.4. Test based on the binomial distribution
 - 4.3.5. Larger sample size
5. Definition of subranges for the test based on the non-central t-distribution
 - 5.1. General
 - 5.2. Definition of subranges for products in the scope of EN 55011
 - 5.3. Definition of subranges for products in the scope of EN 55014-1
 - 5.4. Definition of subranges for products in the scope of EN 55015

Der Anwendungsbereich (Scope) der PrEN 50715 ist in Bild 2 dargestellt.

1 Scope

This document specifies statistical considerations for the evaluation of unwanted radio frequency emissions of mass produced products.

Note 1 It is based on CISPR TR 16-4-3.

The reasons for such statistical considerations are:

- a) that the abatement of interference aims that the majority of the products to be approved shall not cause interference;
- b) that the CISPR limits should be suitable for the purpose of type approval of mass-produced products as well as approval of single-produced products;
- c) that to ensure compliance of mass-produced products with the CISPR limits, statistical techniques have to be applied;
- d) that it is important for international trade that the limits shall be interpreted in the same way in every country.

Therefore, this document specifies requirements and provides guidance based on statistical techniques. EMC compliance of mass-produced products with the requirements of this document are based on the application of statistical techniques that reassure the consumer, with an 80 % degree of confidence, that 80 % of the products of a type being investigated comply with the limits for unintended radio frequency emission.

Bild 2: Auszug aus dem Anwendungsbereich der prEN 50715

Im Weiteren enthält die prEN 50715 alle Empfehlungen, die jetzt in informativen Anhängen der drei genannten Normen enthalten sind, inclusive der Frequenzbereiche für eine Auswertung mittels der nicht-zentralen t-Verteilung. Wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, wird diese Norm nicht für eine Listung im Amtsblatt der EU unter der EMV-Direktive vorgeschlagen.

5 Risiko für Hersteller bei fehlender Festlegung, wie große Serien bewertet werden

Es gibt Anzeichen, dass nach Umsetzung der Langzeitlösung nicht mehr alle europäischen Marktüberwachungsbehörden die 80/80-Regel akzeptieren wollen und sich vorbehalten, nach welcher statistischen Methode sie Serienprodukte beurteilen wollen. Diese Intransparenz birgt ein großes Risiko für alle Hersteller von Produkten in größeren Stückzahlen. Die folgenden Berechnungen zeigen, dass sich bei Anwendung einer schärferen Regel als die etablierte 80/80-Regel extreme Unterschiede ergeben können.

5.1 Unterschiede bei Anwendung der Methode „Prüfung auf der Basis eines allgemeinen Abstands zum Grenzwert“

Bei dieser Methode wird von allen Geräten in der Stichprobe statistisch nur der kleinste Abstand zum Grenzwert ausgewertet.

Beruhend auf der sehr konservativen Annahme einer Standardabweichung von $\sigma = 6,0$ dB kann nachgewiesen werden, dass die 80/80 Regel eingehalten wird, wenn abhängig vom Umfang der Stichprobe dieser kleinste Abstand nicht den Wert unterschreitet, der in Tabelle 2 angegeben wird.

Diese Methode ist übrigens nur für ein positives Ergebnis endgültig. Ein negatives Ergebnis muss nicht endgültig sein, weil hier nicht eine gemessene Standardabweichung verwendet wurde, sondern eine konservative Schätzung.

Der Unterschied bei der Anwendung unterschiedlicher Regeln wird aber bereits deutlich sichtbar.

Umfang der Stichprobe	3	4	5	6
Allgemeiner Abstand zum Grenzwert	3,8	2,4	1,5	0,7

Tabelle 2: Allgemeine Abstände zum Grenzwert mit 80/80 Regel

Wird beispielsweise eine 95/95 Regel angewendet (95% der Geräte sollen mit 95%iger Sicherheit unter dem Grenzwert sein) so ergeben sich die Werte in Tabelle 3.

Umfang der Stichprobe	3	4	5	6
Allgemeiner Abstand zum Grenzwert	11,9	10,3	9,1	8,2

Tabelle 3: Allgemeine Abstände zum Grenzwert mit 95/95 Regel

Das heißt, die Anwendung einer 95/95-Regel anstelle der 80/80-Regel ist äquivalent zu einer Grenzwertverschärfung von fast 10 dB. Kommt jemand auf die Idee eine 99/99-Regel zu verwenden, ergeben sich die Werte wie in Tabelle 4 dargestellt, also eine noch höhere Grenzwertverschärfung.

Umfang der Stichprobe	3	4	5	6
Allgemeiner Abstand zum Grenzwert	18,7	16,8	15,5	14,5

Tabelle 4: Allgemeine Abstände zum Grenzwert mit 99/99 Regel

Völlig unabhängig von der verwendeten Methode zur statistischen Bewertung von serienproduzierten Geräten ergibt sich bei Prüfung einer Stichprobe mit einer endlichen Anzahl von Geräten immer ein „Nicht Bestanden“, wenn jemand auf die Idee kommt zu verlangen, dass 100% der Geräte mit 100%iger Sicherheit die Grenzwerte einhalten.

Ein statistischer Nachweis anhand einer Stichprobe für eine „100/100-Regel“ wäre nur möglich, wenn es bei den Messungen überhaupt keine Streuung geben würde, also bei einer Standardabweichung $\sigma = 0,0$ dB. Das ist aber schon allein durch die Messgeräteunsicherheit nicht möglich. Schon das kleinste Empfängerrauschen erzeugt eine Standardabweichung $> 0,0$ dB.

Die Einhaltung einer 100/100-Regel kann also nur durch eine Messung von 100% aller Geräte nachgewiesen werden. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Funkentstörungsmessungen über alle Frequenzbereiche an einem einzelnen Gerät, bei dem auch noch verschiedene Betriebszustände und Betriebsarten überprüft werden müssen, sehr schnell 2 Tage oder noch länger dauern können. Eine solche Messung an 100% aller Geräte ist also für größere Stückzahlen wirtschaftlich nicht möglich.

5.2 Unterschiede bei Anwendung der Methode „Prüfung auf der Basis der Binomial-Verteilung“

Hier wird das Problem mit anderen Regeln als der 80/80-Regel noch offensichtlicher. Die Anforderungen bei Anwendung der Binomialverteilung wurden bereits im Abschnitt 2.2 erläutert. Tabelle 1 sagt zum Beispiel aus, dass die Anforderungen erfüllt sind, wenn 7 Geräte getestet wurden und dabei keine Grenzwertüberschreitung festgestellt wurde.

Wird anstelle der 80/80-Regel beispielsweise auch hier eine 95/95-Regel angewendet (95% der Geräte sollen mit 95%iger Sicherheit die Grenzwerte einhalten), ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Werte.

<i>n</i>	59	93	124	153	181
<i>c</i>	0	1	2	3	4

Tabelle 5: Anwendung der Binomialverteilung mit 95/95-Regel

Zum Nachweis der Übereinstimmung mit einer 95/95-Regel müssen dann bereits 59 Geräte ohne jegliche Grenzwertüberschreitung getestet werden.

Wie bereits erläutert, dauern die Funkentstörungsmessungen über alle Frequenzbereiche an einem einzelnen Gerät mit mehreren Betriebsarten oft etwa 2 Tage. Das heißt, der Nachweis der

Übereinstimmung mit einer 95/95-Regel könnte nach dieser Methode bereits 118 Arbeitstage dauern, etwa ein halbes Jahr. Das ist weder für einen Hersteller noch für eine Marktüberwachung akzeptabel.

Es ergibt sich, dass mit einer 95/95-Regel die Anwendung der Binomialverteilung nicht mehr möglich ist. Wie wir im Abschnitt 2.2 gesehen haben, ist aber die Anwendung dieser Methode die einzige realistische Möglichkeit, eine Grenzwertüberschreitung $> 2\text{dB}$ zu kompensieren. So eine Notwendigkeit könnte sich z.B. durch einen defekten Kondensator ergeben, was so selten vorkommt, dass deswegen auf keinen Fall eine Serienproduktion gestoppt werden muss.

Wollte man übrigens die Methode „Prüfung auf der Basis der Binomial-Verteilung“ mit einer 99/99-Regel anwenden, müssten bereits 459 Geräte ohne Grenzwertüberschreitung getestet werden, was dann etwa 918 Arbeitstage oder etwa 3 Jahre dauern könnte. Diese Zahl bedarf keiner weiteren Kommentierung.

6 Zusammenfassung

Die Bewertung der Funkentstörung von Geräten in Serienproduktion kann nur mit Hilfe einer statistischen Auswertung erfolgen.

Dabei ist es bereits vor Beginn einer Serienproduktion für einen Hersteller sehr wichtig zu wissen, nach welcher Methode eine mögliche Marktüberwachung durchgeführt wird. Nach Meinung der Autoren dieses Beitrags sollte auch weiterhin die etablierte 80/80-Regel angewendet werden. Wenn das klargestellt ist, ergeben sich noch zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Abschätzung der Annahmewahrscheinlichkeit für eine eventuelle wiederholte statistische Prüfung. Auch eine einzelne Grenzwertüberschreitung kann noch kompensiert werden – praktisch aber nur unter Anwendung der Methode „Prüfung auf der Basis der Binomial-Verteilung“, auch wenn das einen erheblichen Aufwand bedeutet.

Die statistischen Methoden werden aber von der EU-Kommission nicht mehr in Normen akzeptiert, die unter der EMV-Richtlinie im Amtsblatt der EU gelistet werden sollen. Mit einer Veröffentlichung der EN 50715 würde die von CENELEC mit der EU-Kommission vereinbarte Langzeitlösung zu diesem Problem umgesetzt und die Situation für alle Beteiligten akzeptabel bleiben. Wird eine schärfere Regel als die 80/80-Regel angewendet, können sich sehr schnell ungerechtfertigte Verschärfungen an die Anforderungen zur Funkentstörung von Geräten ergeben. Wenn dazu noch unklar ist, welche Regel bei einer Marktüberwachung mit statistischer Auswertung angewendet wird, bedeutet das für die Hersteller von Seriengeräten eine immense Unsicherheit, die nur mit unrealistisch hohem Aufwand reduziert werden könnte.

Literaturangaben

- [1] CISPR TR 16-4-3:2004+AMD1:2006 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling - Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products
- [2] prEN 50715:2021 (pr=68318) Electromagnetic compatibility - Radio frequency emission - Statistical considerations in the determination of compliance for mass-produced products with emission requirements
- [3] Deter, Dunker, Kleppmann “Neue Verfahren zur statistischen Auswertung von Funkstörmessungen unter Berücksichtigung der Annahmewahrscheinlichkeit einer Stichprobe”, Beitrag zum EMV-Kongress in Düsseldorf, 2004