

# MESSUNSICHERHEIT BEI LEITUNGSGEBUNDENEN STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNGEN NACH DER NEUEN IEC 61000-4-6 Ed. 3.0

Dr. Ralf Heinrich, Entwicklungsleiter, Teseq GmbH

Die neue IEC 61000-4-6 Ed. 3.0 enthält in einem informativen Anhang Hinweise zur Messunsicherheit, die im Rahmen dieses Beitrages vorgestellt und an einem Beispiel angewendet werden.

## 1 EINLEITUNG

Die Messunsicherheit hat auch in der EMV eine große Bedeutung. Für den Bereich der Emission sind in diesem Zusammenhang die CISPR 16-4-1 [1] und CISPR 16-4-2 [2] seit längerem bekannt. Auch im Bereich der Störfestigkeit wird auf internationaler Ebene intensiv an dem Thema Messunsicherheit gearbeitet. Wie in [3] beschrieben, wurde die diesbezügliche Arbeit auf die einzelnen Arbeitsgruppen der Unterkomitees aufgeteilt, um basierend auf den einzelnen Prüfverfahren die entsprechenden Verfahren und Hinweise zur Behandlung der Messunsicherheit zu erarbeiten. Besonders hervorzuheben ist, dass sich nach den Beschlüssen von TC77 die Arbeitsgruppen auf die Betrachtung der Messunsicherheit beschränken, die auf die verwendeten Messgeräte zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Arbeiten werden nach und nach in informativen Anhängen zu den einzelnen Störfestigkeitsnormen der IEC 61000-4-x Serie erscheinen. Mit der neuen IEC 61000-4-6 Ed. 3.0 [4] liegt nun die erste Norm der IEC 61000-4-x Serie vor, die einen informativen Anhang zur Behandlung der Messunsicherheit enthält.

Ziel dieses Beitrages ist es, die Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets entsprechend den Vorgaben des informativen Anhangs der IEC 61000-4-6 Ed. 3.0 mit einem Beispiel zu unterstützen. Die dafür ggf. erforderlichen Grundlagen sind nicht Gegenstand dieses Beitrages und können z.B. in [5], [6], [7], [8] oder [9] gefunden werden.

## 2 MESSUNSICHERHEIT DER PRÜFEINRICHTUNG

### 2.1 Definition der Messgröße

Bei der leitungsgeführten Störfestigkeitsprüfung nach IEC 61000-4-6 wird der Prüfling einer Störquelle ausgesetzt, deren Störgröße über ein Koppelnetzwerk auf Leitungen des Prüflings eingekoppelt wird. Dabei kommen verschiedene Koppelinrichtungen zum Einsatz, wie z.B. CDN, EM-Koppelstrecke oder Stromzange. Das Prüfstörsignal ergibt sich aus dem bei der PrüfpegelEinstellung ermittelten Signalpegel, der mit einem Sinus von 1 kHz und einer Tiefe von 80 % amplitudenmoduliert wird.

Das Prüfstörsignal besteht damit aus mehreren Parametern (z. B. Amplitude, Frequenz, Modulationsgrad und -frequenz), die jeweils mit einer Unsicherheit behaftet sein können. Ferner ist die Wirkung dieser Parameter auf

den Prüfling nicht immer vorhersehbar, d. h. mehrere Parameter des Prüfstörsignals können das Testergebnis beeinflussen.

Aufgrund der verschiedenen Parameter des Prüfstörsignals sind ggf. mehrere Unsicherheitsbudgets erforderlich, um das Prüfstörsignal hinsichtlich seiner Messunsicherheit vollständig zu charakterisieren. Im aktuellen Anhang der IEC 61000-4-6 wird beispielhaft die Messunsicherheit bei der Einstellung des Prüfpegels betrachtet. Daraus wurde die für die Behandlung der Messunsicherheit maßgebliche Messgröße abgeleitet: „... Messgröße ist die Spannung, mit der ein hypothetischer Prüfling mit einer Impedanz von 150 Ohm während der Prüfung beaufschlagt würde, wenn der Pegel entsprechend 6.4.1 eingestellt wurde...“ [4].

Die in dem aktuellen Anhang der IEC 61000-4-6 verwendeten Methoden und Verfahren zur Behandlung der Messunsicherheit sind auch auf andere Parameter des Prüfstörsignals für dessen vollständige Charakterisierung anwendbar. Dazu soll an dieser Stelle insbesondere auf das im Rahmen der Bearbeitung der Messunsicherheit für die IEC 61000-4-6 und IEC 61000-4-3 entstandene Informationsdokument [9] verwiesen wer-

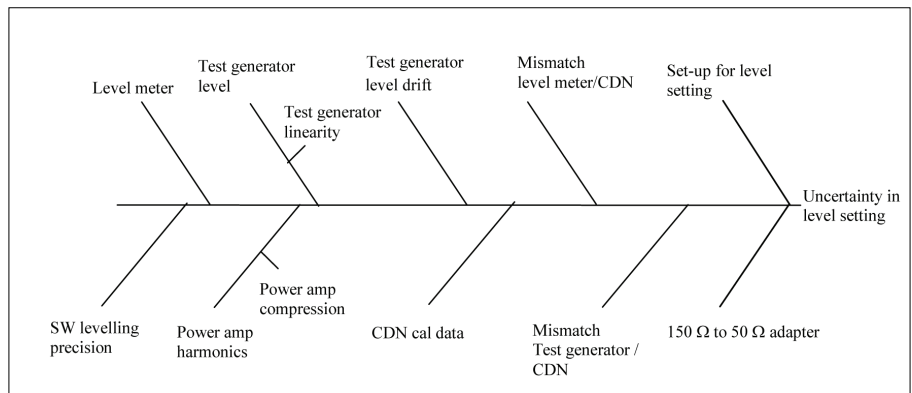


Bild 1: Einflussdiagramm von Messunsicherheitsbeiträgen auf die Unsicherheit der Pegel-einstellung für die Koppelinrichtung CDN (Quelle: [4])

den. Dieses Dokument enthält weiterführende Informationen zur Behandlung der Messunsicherheit für Störfestigkeitsprüfungen, die jedoch aufgrund ihres allgemeinen Charakters nicht in jedem normenspezifischen Anhang wiederholt werden.

### 2.2 Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets

Wie bereits erwähnt, kommen bei der Prüfung der leitungsgebundenen Störfestigkeit verschiedene Koppelinrichtungen zum Einsatz, die auch leicht unterschiedliche Messunsicherheitsbudgets nach sich ziehen. Die nachfolgenden Betrachtungen werden sich schwerpunktmäßig auf die häufig verwendete Koppelinrichtung CDN beziehen.

Ein wesentlicher erster Schritt zur Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets für eine bestimmte Messgröße ist die Zusammenstellung der relevanten Messunsicherheitsbeiträge. Hierbei ist zu prüfen, ob sich die Beiträge auch tatsächlich auf die definierte Messgröße beziehen, was im vorliegenden Fall die Einstellung des Prüfpegels für einen hypothetischen Prüfling mit einer Impedanz von 150 Ohm ist. Mit Hilfe eines Einflussdiagramms lassen sich die Beiträge sinnfällig in übersichtlichen Gruppen zusammenstellen. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel eines solchen Einflussdiagramms für die Koppelinrichtung CDN.

Die Zusammenstellung der relevanten Messunsicherheitsbeiträge sollte möglichst umfassend und vollständig erfolgen. Selbst wenn bestimmte Beiträge zunächst unbedeutend erscheinen mögen, ist es besser diese im ersten Schritt mit aufzunehmen. Bei der späteren Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets können aus dieser Zusammenstellung die wichtigsten Beiträge für das Budget ausgewählt werden, wie es bei den Messunsicherheitsbudgets in Tabellen 1 und 2 der Fall ist.

Die Messunsicherheitsbudgets in den Tabellen 1 und 2 gliedern sich in ein Budget für die Unsicherheit bei der Ermittlung des Prüfpegels (Kalibrierung) und ein Budget für die Unsicherheit bei der Wiedereinstellung des bei der Kalibrierung ermittelten Prüfpegels für die Durchführung des Tests. Beim Messunsicherheitsbudget für den Test geht die Kalibrierunsicherheit als ein Beitrag (CAL) mit ein.

Die Tabellen 1 und 2 wurden auf Grundlage des Einflussdiagramms erstellt. Jedem Unsicherheitsbeitrag  $X_i$  wurde ein Wert  $U(x_i)$  zugeordnet. In Abhängigkeit vom Messunsicherheitsbeitrag und der Ermittlung des zugehörigen  $U(x_i)$  ergeben sich verschiedene Verteilungsfunktionen für  $U(x_i)$ .

• **Normal:** Die Normal- oder Gaussverteilung wird verwendet, wenn der Unsicherheitsbeitrag mit Hilfe einer statistischen Analyse ermittelt wurde, z.B. Kalibrierunsicherheit.

Symbol	Uncertainty Source $X_i$	$U(x_i)$	Unit	Distribution	Divisor	$u(x_i)$	Unit	$c_i$	$u_i(y)$	Unit	$u_i(y)^2$
RCAL	150 to 50 Ohm adapter, deviation	0,3	dB	rect	1,73	0,17	dB	1	0,17	dB	0,03
	150 to 50 Ohm adapter, calib.	0,2	dB	normal k=2	2	0,10	dB	1	0,10	dB	0,01
SETUP	Set-up for level setting	0,35	dB	normal k=1	1	0,35	dB	1	0,35	dB	0,12
LMc	Level meter	0,5	dB	rect	1,73	0,29	dB	1	0,29	dB	0,08
SWc	SW levelling precision	0,3	dB	rect	1,73	0,17	dB	1	0,17	dB	0,03
LMCc (1,2)	Level meter in control loop	0	dB	rect	1,73	0,00	dB	1	0,00	dB	0,00
TGc (1,2)	Test generator	0	dB	rect	1,73	0,00	dB	1	0,00	dB	0,00
MTc (3)	Mismatch Test generator/CDN	0	dB	U-shaped	1,41	0,00	dB	1	0,00	dB	0,00
ML	Mismatch Level meter/CDN	-0,5	dB	U-shaped	1,41	-0,35	dB	1	-0,35	dB	0,13
$\sum u_i(y)^2$											0,40
Combined uncertainty $u(y) = \sqrt{\sum u_i(y)^2}$											0,63
Expanded Uncertainty (CAL) $U = u(y) \cdot k, k = 2$											1,27

Tabelle 1: Beispiel für ein Messunsicherheitsbudget für den Kalibriervorgang bei Verwendung eines CDN's (Quelle: [4])

Symbol	Uncertainty Source $X_i$	$U(x_i)$	Unit	Distribution	Divisor	$u(x_i)$	Unit	$c_i$	$u_i(y)$	Unit	$u_i(y)^2$
CAL	Calibration	1,27	dB	normal k=2	2	0,63	dB	1	0,63	dB	0,40
LMCt (1,2)	Level meter in control loop	0,3	dB	rect	1,73	0,17	dB	1	0,17	dB	0,03
TGt (1,2)	Test generator	0	dB	rect	1,73	0,00	dB	1	0,00	dB	0,00
MTt (3)	Mismatch Test generator/CDN	0	dB	U-shaped	1,41	0,00	dB	1	0,00	dB	0,00
SWt	SW levelling precision	0,3	dB	rect	1,73	0,17	dB	1	0,17	dB	0,03
$\sum u_i(y)^2$											0,46
Combined uncertainty $u(y) = \sqrt{\sum u_i(y)^2}$											0,68
Expanded uncertainty $U = u(y) \cdot k, k = 2$											1,36

Tabelle 2: Beispiel für ein Messunsicherheitsbudget für den Test bei Verwendung eines CDN's (Quelle: [4])

- **Rechteck:** Die Rechteckverteilung wird benutzt, wenn nur die Ober- und Untergrenze bekannt ist und die Wahrscheinlichkeit innerhalb dieser Grenzen gleichmäßig verteilt ist, z.B. wenn die Messunsicherheit aus den technischen Daten des Messgerätes entnommen wird.
- **U-Verteilung:** Die U-Verteilung dient der Beschreibung von Unsicherheiten durch Fehlanpassung.
- **Dreieck:** Die Dreiecksverteilung kommt zum Einsatz, wenn die Mehrheit der Werte um einen zentralen Punkt herum liegt.

Die Standardunsicherheit  $u(x_i)$  wird aus dem zum Messunsicherheitsbeitrag gehörigen Wert  $U(x_i)$  und dem Divisionsfaktor der Verteilungsfunktion entsprechend Tabelle 3 berechnet.

Verteilungsfunktion	Divisionsfaktor
Normal	Erweiterungsfaktor, k
Rechteck	$\sqrt{3}$
U-Verteilung	$\sqrt{2}$
Dreieck	$\sqrt{6}$

Tabelle 3: Divisionsfaktoren der Verteilungsfunktionen

Die kombinierte Unsicherheit  $u(y)$  für N Beiträge wird mit dem Verfahren der Summe der Fehlerquadrate der einzelnen Standardunsicherheiten  $u(x_i)$  berechnet. Dieses Verfahren ist anwendbar, wenn alle Eingangsgrößen dieselbe Einheit haben, unkorreliert sind und im logarithmischen Maßstab addiert werden

können. Die Eingangsgrößen  $x_i$  tragen entsprechend der Modellfunktion (1) zur Ausgangsgröße  $y$  bei.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N \quad (1)$$

Die individuellen Beiträge  $u_i(y)$  zur kombinierten Unsicherheit  $u(y)$  ergeben sich aus der Standardunsicherheit  $u(x_i)$  und dem Sensitivitätskoeffizienten  $c_i$  nach (2),

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (2)$$

wobei der Sensitivitätskoeffizient  $c_i$  aus der partiellen Ableitung der Modellfunktion nach der Eingangsgröße berechnet wird.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

Die kombinierte Unsicherheit  $u(y)$  für N Beiträge wird aus der Wurzel der Summe der Quadrate der einzelnen Beiträge  $u_i(y)$  berechnet.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (4)$$

Die erweiterte Unsicherheit  $U$  ergibt sich aus der Multiplikation der kombinierten Unsicherheit  $u(y)$  mit dem Erweiterungsfaktor  $k$ .

$$U = k \cdot u(y) \quad (5)$$

Bei den Tabellen 1 und 2 gibt es noch eine Besonderheit. Bestimmte Beiträge sind mit einem Wert von Null im Budget aufgenommen.

Symbol	Uncertainty Source $X_i$	$U(x_i)$	Unit	Distribution	Divisor	$u(x_i)$	Unit	$c_i$	$u_i(y)$	Unit	$u_i(y)^2$
RCAL	150 to 50 Ohm adapter, deviation	0,14	dB	rect	1,73	0,08	dB	1	0,08	dB	0,01
	150 to 50 Ohm adapter, calib.	0,5	dB	normal k=2	2	0,25	dB	1	0,25	dB	0,06
SETUP	Set-up for level setting	0,4	dB	normal k=1	1	0,40	dB	1	0,40	dB	0,16
LMc	Level meter	0,08	dB	normal k=2	2	0,04	dB	1	0,04	dB	0,00
SWc	SW levelling precision	0,1	dB	rect	1,73	0,06	dB	1	0,06	dB	0,00
ML	Mismatch Level meter/CDN	-0,5	dB	U-shaped	1,41	-0,35	dB	1	-0,35	dB	0,13
$\sum u_i(y)^2$											0,36
Combined uncertainty $u(y) = \sqrt{\sum u_i(y)^2}$											0,60
Expanded Uncertainty (CAL) $U = u(y) \cdot k, k = 2$											1,20

Tabelle 4: Messunsicherheitsbudget für den Kalibriervorgang bei Verwendung eines CDN's

Symbol	Uncertainty Source $X_i$	$U(x_i)$	Unit	Distribution	Divisor	$u(x_i)$	Unit	$c_i$	$u_i(y)$	Unit	$u_i(y)^2$
CAL	Calibration	1,20	dB	normal k=2	2	0,60	dB	1	0,60	dB	0,36
LMC <sub>i</sub>	Level meter in control loop	0,1	dB	rect	1,73	0,06	dB	1	0,06	dB	0,00
SW <sub>i</sub>	SW levelling precision	0,1	dB	rect	1,73	0,06	dB	1	0,06	dB	0,00
$\sum u_i(y)^2$											0,37
Combined uncertainty $u(y) = \sqrt{\sum u_i(y)^2}$											0,61
Expanded uncertainty $U = u(y) \cdot k, k = 2$											1,21

Tabelle 5: Messunsicherheitsbudget für den Test bei Verwendung eines CDN's

Das ist der Tatsache geschuldet, dass für die Prüfung der leitungsgebundenen Störfestigkeit Systeme mit unterschiedlichem internen Aufbau zum Einsatz kommen (siehe mit (1,2) gekennzeichnete Beiträge in den Tabellen 1 und 2).

Bei Systemen mit einer internen Rückkopplung des Ausgangssignals des Prüfgenerators (Leistungsverstärkers) über einen Richtkoppler mit angeschlossenem Leistungsmesser wird die Unsicherheit im Wesentlichen durch den Leistungsmesser bestimmt, da sich der Prüfgenerator innerhalb der Rückkopplungsschleife befindet und damit nicht zur Unsicherheit beiträgt. Ohne diese Rückkopplungsschleife entfällt zwar der Unsicherheitsbeitrag des diesbezüglichen Leistungsmessers, dafür geht jedoch die Unsicherheit des Prüfgenerators mit seinen Komponenten Signalgenerator, Leistungsverstärker usw. voll in das Unsicherheitsbudget ein.

Einige Beiträge werden nur relevant, wenn bei Kalibrierung und Test unterschiedliche Komponenten (z. B. Kabel) verwendet werden, siehe mit (3) gekennzeichnete Beiträge in den Tabellen 1 und 2.

### 3 ANWENDUNGSBEISPIEL

Am Beispiel eines handelsüblichen Kompaktgenerators soll entsprechend dem informativen Anhang der IEC 61000-4-6 ein Messunsicherheitsbudget für die verwendeten Messgeräte zur Prüfung der leitungsgebundenen Störfestigkeit mit der Koppereinrichtung CDN aufgestellt werden.

Bei dem gewählten Kompaktgenerator NSG 4070 der Firma TESEQ GmbH handelt es sich um ein Gerät mit der bereits erwähnten internen Rückkopplung des Ausgangssignals des Prüfgenerators (Leistungsverstärkers) über einen Richtkoppler mit angeschlossenem internen Leistungsmesser. Damit entfallen die Beiträge des Testgenerators  $TG_c$  und  $TG_i$ .

Für den Leistungsmesser zur Kalibrierung des Testaufbaus ( $LM_c$ ) findet man im Datenblatt eine Genauigkeitsangabe von typisch  $< 0,4$  dB. Diese Angabe bezieht sich jedoch auf den weiten Einsatzbereich des Gesamtgerätes von 9 kHz bis 1 GHz. Der tatsächliche Wert kann irgendwo im Fenster von  $\pm 0,4$  dB liegen. Besser wäre es, den Leistungsmesser kalibrieren zu lassen und die Abweichung zu berücksichtigen, so dass damit die Unsicherheit auf die deutlich kleinere Kalibrierunsicherheit reduziert werden kann. Besonders vorteilhaft ist es, wenn im Rahmen der Kalibrierung die Korrekturwerte gleich im Leistungsmesser intern abgelegt werden können. Im vorliegenden Fall beträgt die Kalibrierunsicherheit 0,08 dB, die mit einer Normalverteilung ins Budget eingetragen wird.

Der interne Leistungsmesser der Rückkopplungsschleife wird für Kalibrierung und Test verwendet. Der Beitrag  $LM_c$  ist somit nicht relevant. Es gehen nur die Beiträge der Wiederholbarkeit und Linearität ein, die mit dem Beitrag  $LM_i$  berücksichtigt werden und bei 0,1 dB liegen.

Die interne Regelung des NSG 4070 arbeitet mit einer Regelgenauigkeit von  $\pm 0,1$  dB, die für die Beiträge  $SW_c$  und  $SW_i$  eingetragen werden kann.

Mit dem Kompaktgenerator wird derselbe Aufbau für Kalibrierung und Test verwendet, so dass eine Analyse der Fehlanpassung zwischen Testgenerator und CDN (Beiträge  $MT_c$  und  $MT_i$ ) nicht erforderlich ist.

Angaben zum Beitrag des 150 zu 50 Ohm Adapters (RCAL) sind im diesbezüglichen Kalibrierzertifikat zu finden. Die angegebene Abweichung beträgt 0,14 dB. Zur Unsicherheit ist bis 26 MHz 0,1 dB angegeben, darüber 0,5 dB.

Der Beitrag SETUP fasst mehrere Unsicherheitsbeiträge des Kalibrier- und Testaufbaus zusammen, wie z. B. Kontakt zur Masseplatte usw. Bei experimentellen Untersuchungen wurde hinsichtlich des Massekontaktes ein

Fehler von 0,2 dB ermittelt. Zusammen mit den anderen Fehlerbeiträgen ergeben sich 0,4 dB für SETUP.

Die Ermittlung des Fehlerbeitrages durch Fehlanpassung zwischen Leistungsmesser und CDN (ML) ist recht komplex, da hier der 150 zu 50 Ohm Übergang und auch die parasitäre Kapazität des Kalibrieradapters zur Unsicherheit beitragen. In [9] werden einige Hinweise zur Bestimmung der Unsicherheit durch Fehlanpassung gegeben. Im vorliegenden Fall ergibt sich ein Beitrag von -0,5 dB.

Damit lässt sich das Messunsicherheitsbudget entsprechend den Tabellen 4 und 5 aufstellen.

Es fällt auf, dass sich insgesamt eine relativ geringe Unsicherheit ergibt. Das liegt einerseits daran, dass hier nur Beiträge der Messtechnik berücksichtigt sind, die bei Verwendung hochwertiger, moderner Geräte von Natur aus eine geringe Unsicherheit aufweisen. Andererseits ist aber auch das Verfahren mit der Koppereinrichtung CDN durch eine geringere Unsicherheit gekennzeichnet als bei der Verwendung anderer Koppereinrichtungen, weshalb diesem Verfahren in der IEC 61000-4-6 auch der Vorzug gegenüber anderen Koppereinrichtungen gegeben wird.

### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Die IEC 61000-4-6 ist die erste Störfestigkeitsnorm der IEC 61000-4-x Serie, die einen informativen Anhang zur Messunsicherheit enthält. Dieser Anhang bezieht sich entsprechend den Vorgaben von TC77 auf die Messunsicherheit der verwendeten Mess- und Prüftechnik zur Erzeugung der Prüfstörgröße. Mit dem informativen Anhang der IEC 61000-4-6 und dem vorliegenden Beitrag soll Prüflaboren die Aufstellung ihrer Messunsicherheitsbudgets erleichtert werden.

### LITERATUR

- [1] CISPR 16-4-1, Ed.1, 2005-02
- [2] CISPR 16-4-2, Ed.1, 2003-11
- [3] Diethard Möhr: „EMV Messunsicherheitsbetrachtungen in IEC TC77“: EMV-ESD Heft 04/2008
- [4] IEC 61000-4-6: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields, Ed. 3.0, 2008
- [5] »Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement«, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995
- [6] UKAS LAB34 Ed. 1, 2002-08
- [7] UKAS M3003, Edition 2, 2007, The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement
- [8] EA Publication, EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. www.european-accreditation.org (free download)
- [9] 77B/558/INF