

Laborvergleich IEC 61000-4-3: Konsequenzen für die Normung?

Dipl.-Ing. Christian Paulwitz, TDK Electronics AG, Deutschland
Dipl.-Ing. (FH) Simon Scheck, TDK Electronics AG, Deutschland
Dr.-Ing. Stefan Weber, TDK Electronics AG, Deutschland

1 Einführung und Beschreibung des Prüflings und des Versuchsaufbaus

Der verwendete Musterprüfling entspricht dem Prüfling aus [1]. Es handelt sich um ein LED-Modul mit Anschlussleitungen, das so modifiziert wurde, dass es für elektromagnetische Felder eine gewisse Empfindlichkeit aufweist. Es weist vier pfeilähnliche LED-Anordnungen auf, von denen im normalen Betriebsmodus zwei leuchten. Im Falle einer Beeinflussung beginnen weitere LEDs zu leuchten oder LEDs hören auf zu leuchten. Ähnlich wie in [1] bereits beschrieben wird ein einheitlicher Prüfablauf und der genaue Aufbau des Prüflings auf einem Tisch (Bild 1) nach [2] festgelegt, das Monitoring und die Ausfallkriterien beschrieben und ein einheitliches Auswerteformular zur Verfügung gestellt.

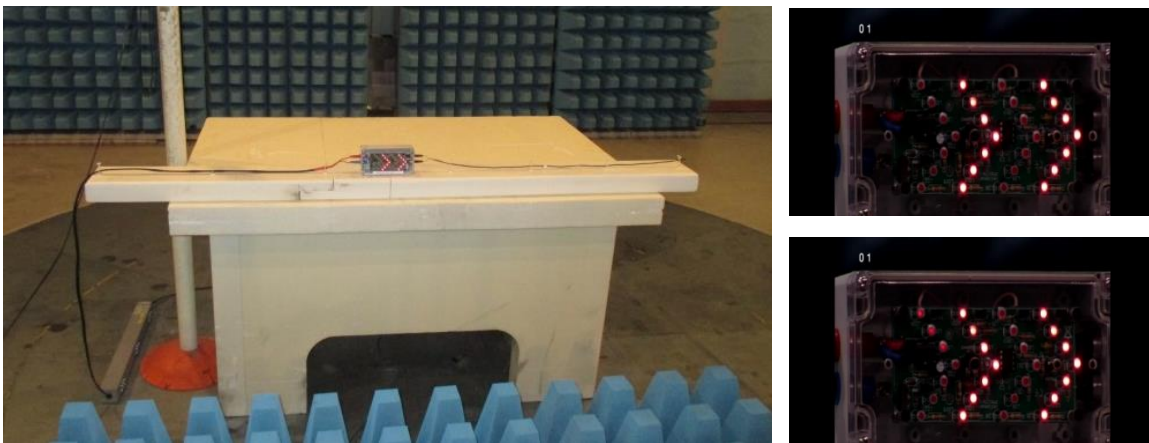


Bild 1: Aufbau des Musterprüflings auf einem Tisch in einer SAC mit zusätzlichen Bodenabsorbieren, rechts Beispiele der Prüflingsoptik: oben Sollbetrieb, unten Beispiel für einen Ausfall

Anders als in [1] beschrieben wird die horizontale Leitungsführung auf einem Styrodurträger fixiert, um mögliche Variationen der Leitungsführung so gut wie möglich auszuschließen. Die Versorgungsleitung wird etwa 80 cm horizontal und dann 80 cm vertikal auf den Boden geführt, wo sie anschließend mit einer CMAD (common mode absorbing device) zur Impedanzvereinheitlichung abgeschlossen wird. Eine zweite horizontale Leitung wird nur horizontal geführt.

Es werden Prüfungen in beiden Antennenpolarisationen mit einer Prüfschärfe von 10 V/m im Frequenzband 80 MHz bis 1 GHz durchgeführt (gesucht: Frequenzgrenzen bei Prüflingsausfall) sowie die Ausfallschwelle in V/m bei festgelegten Einzelfrequenzen (83, 110 und 200 MHz) bis maximal 20 V/m. Das Testsignal wurde jeweils mit der üblichen Amplitudenmodulation von 80 % mit 1 kHz gebildet und mit einer Verweilzeit von 0,5 sec. beaufschlagt.

2 Ergebnisse des Laborvergleichs

Während [1] den prinzipiellen Versuchsablauf beschrieb und die grundsätzliche Eignung des Prüflings untersuchte, stand eine Vergleichsuntersuchung mit einer größeren Zahl von Laboren noch aus. Eine groß angelegte Vergleichsuntersuchung in den Jahren 2019 und 2020, an der sich 11 Labore mit insgesamt 25 Testplätzen – SAC (semi-anechoic chamber) und FAR (fully anechoic room) – beteiligten, brachte nun eine Datenbasis vor, die neue Erkenntnisse liefert.

2.1 Ergebnisse der Frequenzdurchläufe bei 10 V/m Prüfpegel

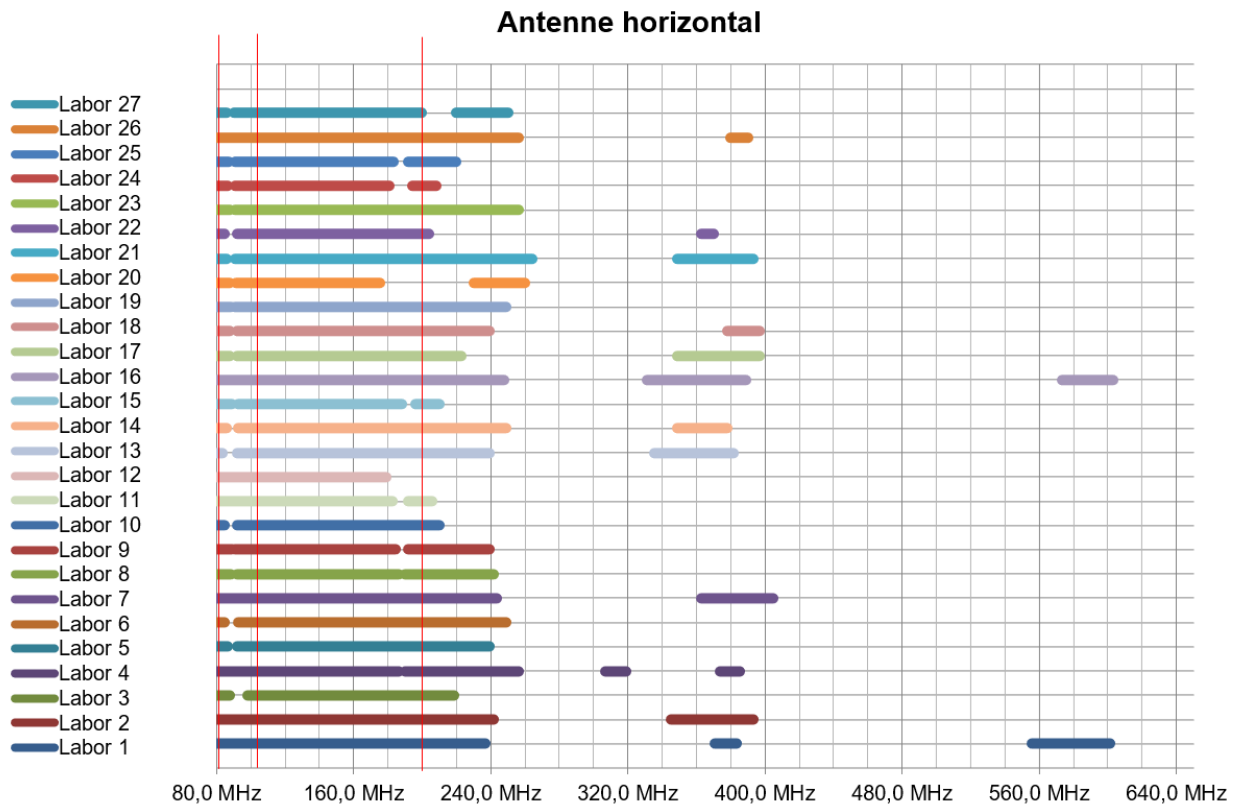


Bild 1: Ausfall bei Prüfschärfe 10 V/m – Antenne horizontal

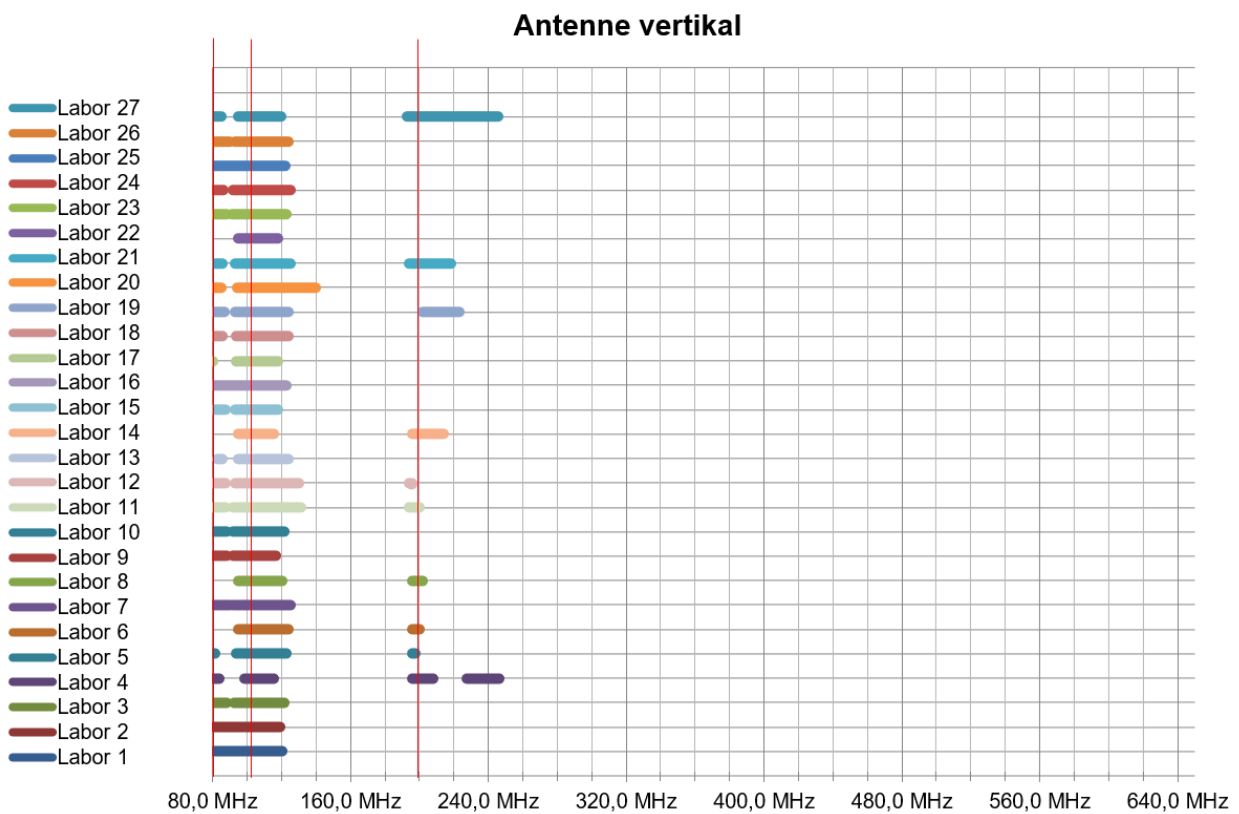


Bild 2: Ausfall bei Prüfschärfe 10 V/m – Antenne vertikal

Es fällt zunächst auf, dass der Prüfling auf horizontal polarisierte Felder empfindlicher reagiert als auf vertikale. Das ist leicht nachzuvollziehen, denn an einem Anschluss ist nur eine horizontal liegende Leitung angeschlossen, während am Anschluss der Spannungsversorgung vom Prüfling aus gesehen zunächst ein Leitungsteil horizontal geführt wird und anschließend vertikal zum Boden verläuft. Die vertikale Einkopplung erfolgt somit weiter entfernt vom Prüfling und wird noch etwas gedämpft über das horizontal verlaufende Leitungsstück. Zwischen 80 und 120 MHz liegen bei vertikaler Einkopplung die Ausfallbereiche sehr ähnlich unter den Laboren; im Bereich um 200 MHz fällt der Prüfling bei einigen Messplätzen aus, bei anderen nicht. Mit Ausnahme von „Labor 27“ handelt es sich um FAR, bei denen der Prüfling um 200 MHz ausfällt, wie mit Bild 3 veranschaulicht wird (nur FAR-Plätze).

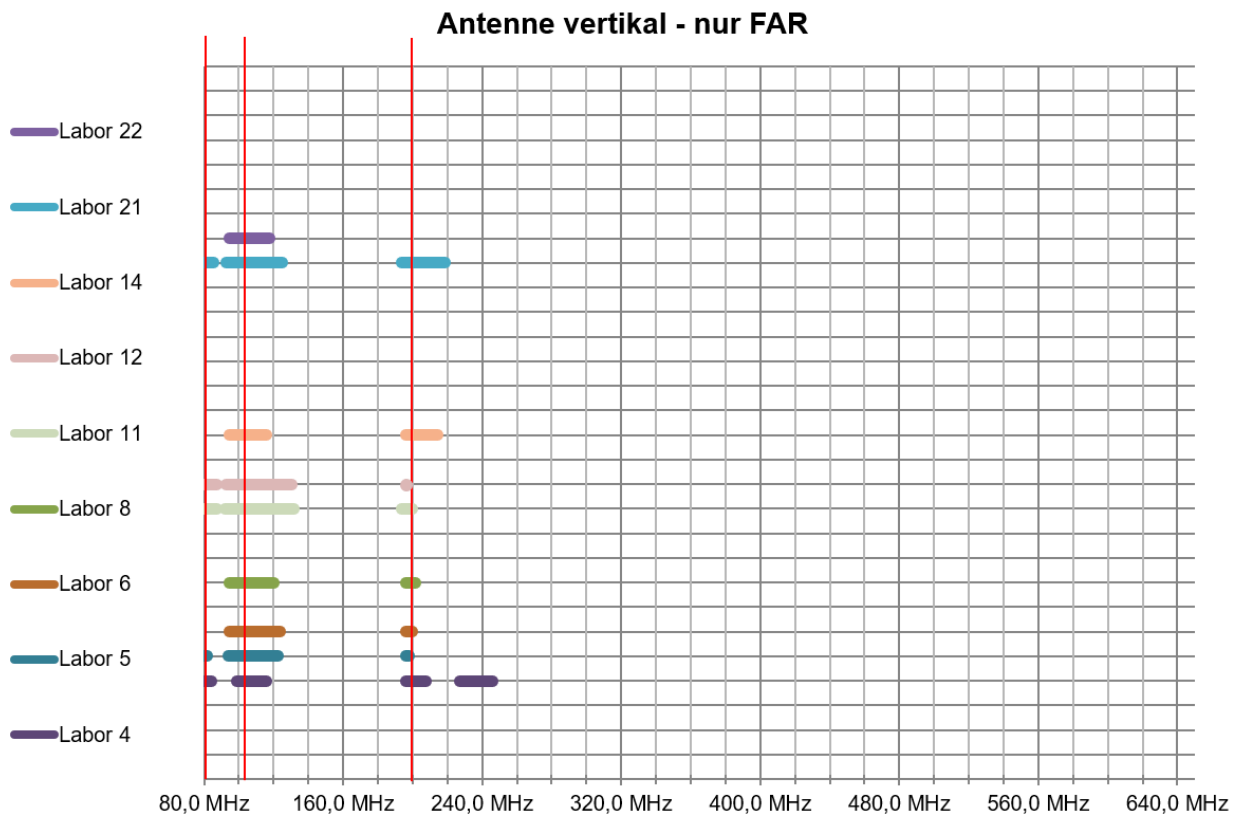


Bild 3: nur FAR-Testplätze – Antenne vertikal

Bei ca. 200 MHz wurde ein Prüflingsausfall zunächst nur und bei allen FAR festgestellt (bei Labor 12 nur bei 194 MHz – Ausfallschwelle bei 200 MHz: 12 V/m). Einzige Ausnahme unter den FAR: Labor 22 (Ausfallschwelle 18 V/m). Keine Ausfälle bei den SAC (Ausnahme Labor 19 – sonst keine Ausfälle unterhalb 18 V/m). Die Erklärung hierzu ist, dass die Groundplane-Fläche zwischen Prüfling und Antenne bei den SAC zwar mit Bodenabsorbieren belegt wird, aber unterhalb des Prüflingsbereichs die Groundplane physikalisch wirksam bleibt, d. h. das E-Feld wird gegen Null heruntergezogen. Daher wird auch bei herabhängenden Leitungen in Richtung Boden eine geringere Feldstärke wirksam einkoppeln können. Die Leitungen verlassen das definierte Prüfvolumen nach unten. In FAR ist dagegen zu erwarten, dass die Feldstärke in einem Abstand von z. B. 40 cm unterhalb des eingemessenen Prüfvolumens weniger stark abfällt.

Ein Versuch am Ende der Testreihe konnte diese These bestätigen. Bei Labor 26 und 27 handelt es sich um dieselbe SAC, während für Labor 26 der Prüfling entsprechend der Vergleichsuntersuchung aufgebaut wurde, stand bei Labor 27 der Prüflingstisch auf einem zweiten Tisch und war dadurch erhöht (CMAD als Abschluss auf dem unteren Tisch, so dass die Leitungslängen gleich blieben) und die dem Feld ausgesetzte Leitung über die ganze Länge auch des vertikalen Abschnitts im eingemessenen gleichförmigen Bereich lag. Das Ausfallverhalten entsprach dem der

FAR und war sogar etwas empfindlicher (vgl. Bild 2). Mögliche Konsequenzen für Prüfaufbauten werden in Abschnitt 4 diskutiert.

2.2 Ergebnisse der Ermittlung der Ausfallschwellen an Einzelfrequenzen

An drei Frequenzen – 83, 110 und 200 MHz wurden sowohl bei vertikaler als auch bei horizontaler Polarisation Ausfallschwellen ermittelt. Laut Vorgabe war die Ausfallschwelle durch Erhöhung der Prüffeldstärke in Schritten von 0,5 V/m zu ermitteln, was zu einer gewissen Vergrößerung führt, die besonders bei niedrigen Ausfallschwellen relativ stärker ins Gewicht fällt. Einige Labore haben jedoch selbständig feinere Schritte gewählt. Die statistische Auswertung der Ergebnisse ist in Tabelle 1 (horizontale Polarisation) und Tabelle 2 (vertikale Polarisation) gegeben.

Frequenz	Median	Mittelwert	σ	σ [% MW]	MW - σ	MW + σ	Med. - σ	Med. + σ
83 MHz	6,5	6,3	1,5	24 %	4,8	7,9	5,0	8,1
110 MHz	1,2	1,3	0,4	30 %	0,9	1,6	0,8	1,5
200 MHz	5,0	5,5	1,8	32 %	3,7	7,3	3,2	6,8

Tabelle 1: Ermittlung der Ausfallschwelle, Ergebnisse Prüffeldstärke in V/m – Antenne horizontal

Frequenz	Median	Mittelwert	σ	σ [% MW]	MW - σ	MW + σ	Med. - σ	Med. + σ
83 MHz	6,5	7,5	3,4	46 %	4,0	10,8	3,0	9,8
110 MHz	3,5	3,5	1,1	32 %	2,4	4,6	2,5	4,6
200 MHz (nur FAR)	10,0	10,4	3,2	31 %	7,2	13,6	7,6	14,0

Tabelle 2: Ermittlung der Ausfallschwelle, Ergebnisse Prüffeldstärke in V/m – Antenne vertikal

Betrachtet man die Ergebnisse der Tabelle 1 (horizontale Polarisation), so liegt die Streuung, also die mittlere Abweichung vom Mittelwert, bei etwa 30 %. Das Verhältnis der Ausfallfeldstärke-Grenzen der Ergebnisse innerhalb von $\pm\sigma$ um den Mittelwert ist kleiner als zwei (6 dB). Da der gleichförmige Bereich mit einer zulässigen Streuung von 0 bis 6 dB – also Faktor 2 – in der Norm angegeben wird, führt dies immer wieder zu der Vorstellung, dies müsse sich in der Streuung der Ergebnisse niederschlagen. Doch davon ist nicht ohne weiteres auszugehen, da die Leitungsführung – bei den hier untersuchten Frequenzen ist die Leitung die wesentliche Einkoppelgeometrie – eher nicht die Extrema der Feldverteilung abbilden muss. Tendenziell ist aber zu erwarten, dass Testplätze mit relativ hoher Streuung (nahe 6 dB) über die (typischerweise) 16 Punkte schärfer testen als solche mit geringerer Streuung (z. B. nur 3 dB), da die Prüfschärfe sich auf die Punkte kleinerer Feldstärken im gleichförmigen Bereich (typischerweise die äußeren Ecken oder die untere Kante) bezieht, während die Prüflingsgeometrie die Feldstärke vielleicht eher im mittigen Bereich einkoppelt. Die Unsicherheit der Messkette für die Erzeugung des Prüfsignals selbst ist bereits in der Größenordnung von gut 2 dB zu erwarten [3].

Tabelle 2 zeigt, dass bei der vertikalen Polarisation bei gegebener Prüflingsanordnung die Ausfallschwellen höher sind, was mit der elektrischen Entfernung des vertikalen Leitungsverlaufs zum Prüfling zusammenhängen dürfte, und zumindest bei 83 MHz auch die Ergebnisse stärker streuen, wobei dies sicher durch die Führung des vertikalen Leitungsverlaufs aus dem homogenen Bereich heraus beeinflusst wird. Würde es sich um einen realen Prüfling im Tischaufbau bei obiger Anordnung handeln, wäre das Prüfergebn hier rein durch das Verhalten bei horizontaler Polarisation bestimmt, da bei den kritischen Frequenzen die Leitungsgeometrie für die Einkoppelung der Störgröße entscheidend ist.

Um die Verteilung der Ausfallschwellen über die 25 Testplätze zu veranschaulichen, werden Boxplot-Diagramme angewendet. Das ausgefüllte Rechteck, geteilt durch den Median (waagrechter Strich) gibt jeweils den Bereich der beiden mittleren Quartile an; der Mittelwert ist als Kreuz angegeben. Die Fähnchen oben und unten geben Maximal- und Minimalwert an. Falls ein Wert außerhalb des 1,5-fachen der Höhe des Rechtecks (Abstand zwischen Grenze erstes und drittes Quartil) oberhalb oder unterhalb des ausgefüllten Rechtecks liegt, wird er als statistischer Ausreißer betrachtet und nicht berücksichtigt.

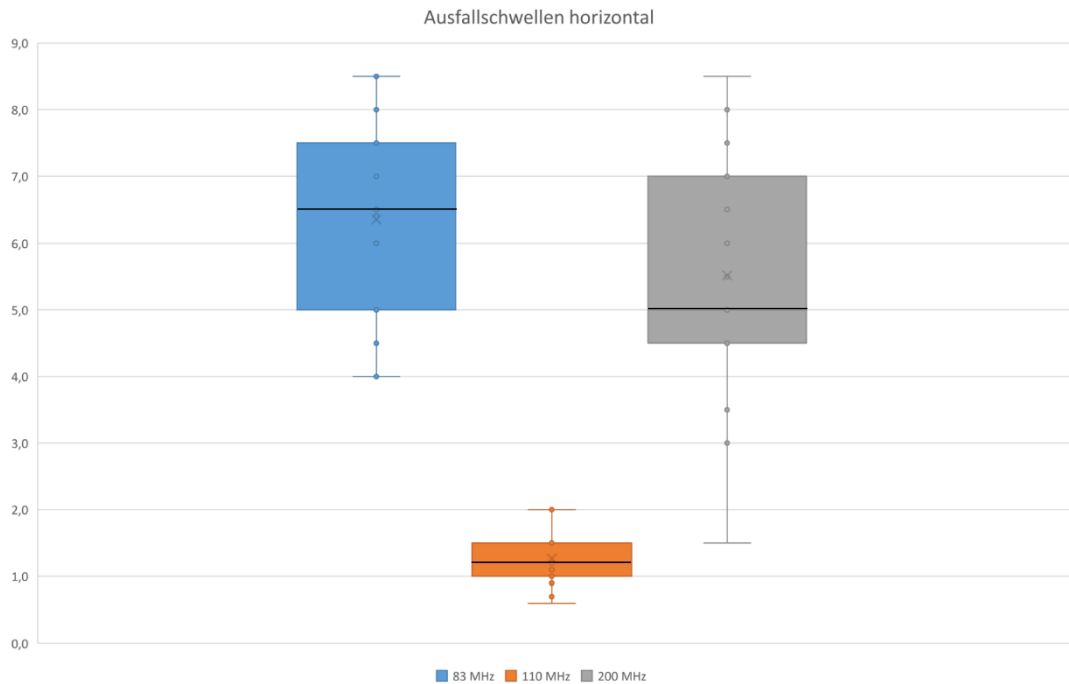


Bild 4: Verteilung der Ausfallschwellen – Antenne horizontal

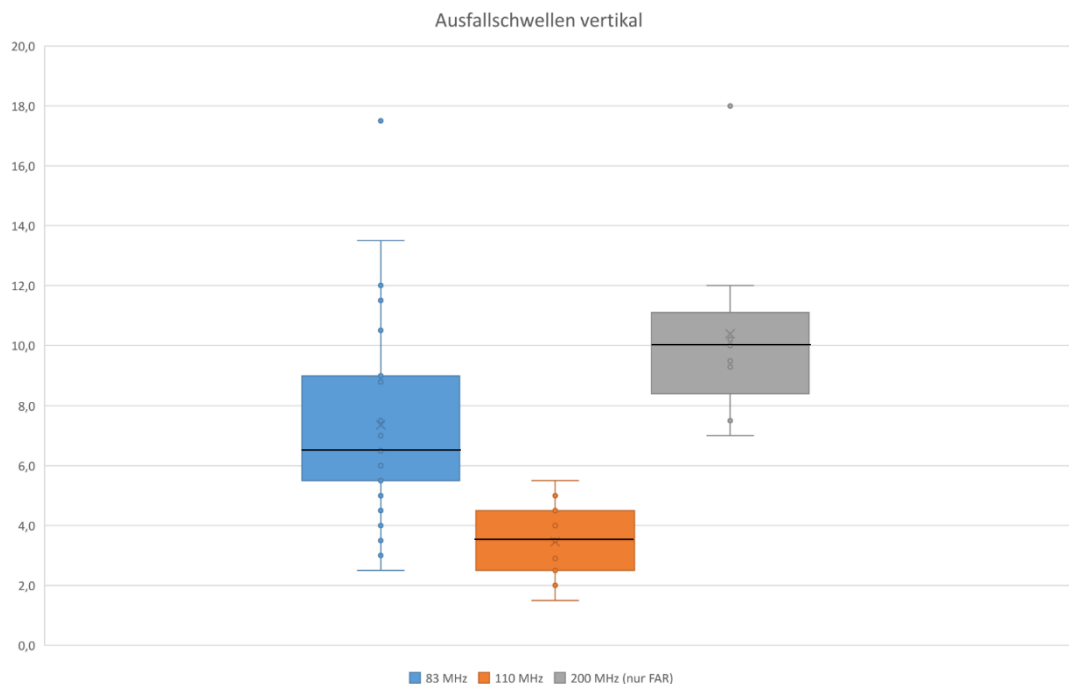


Bild 5: Verteilung der Ausfallschwellen – Antenne vertikal

Die Verteilung der Ergebnisse der horizontalen Ausfallschwellen (Bild 4) zeigen keine statistischen Ausreißer, wohl aber die vertikalen Ausfallschwellen (Bild 5), und zwar jeweils einen bei 83 und bei 200 MHz. Es wurden jeweils besonders hohe Feldstärken für einen Ausfall benötigt. Für Bild 5 wurden ebenso wie für Tabelle 2 bei der Frequenz 200 MHz nur die FAR-Testplätze berücksichtigt, da die SAC-Plätze keine auswertbaren Ergebnisse lieferten.

3 Konsequenzen für die teilnehmenden Labore

Zunächst ist festzustellen, dass der Vergleich unter den Laboren insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse erbracht hat. Im Frequenzdurchlauf wäre der Prüfling mit ähnlichem Ausfallprofil bei der kritischeren Antennenpolarisation bei allen Laboren mit der Prüffeldstärke 10 V/m in ähnlicher Weise durchgefallen. Eine Ausnahme ist der Frequenzbereich um 580 MHz, wo der Prüfling bei nur zwei Laboren auffällig gewesen ist, sonst nicht, und der Frequenzbereich um 380 MHz, bei dem der Prüfling bei rund der Hälfte der Prüfplätze ausgefallen ist. Leider war dieser Bereich bei der Vorbereitung des Versuchs nicht auffällig, sonst wäre die Ermittlung der Ausfallschwelle geplant worden. Im Nachhinein wäre zu vermuten, dass die mittlere Ausfallschwelle knapp um den einfachen Wert der Streuung, die bei den drei anderen Einzelfrequenzen um etwa 30 % lag, oberhalb der Prüffeldstärke gelegen haben müsste. In einer nachfolgenden Untersuchung mit anderen Prüfplätzen und Laboren, bei denen die Ausfallschwelle bei 380 MHz dann auch gesucht wurde, lag die Ausfallschwelle bei geringer Streuung im Mittel bei 13 V/m. Das geht in diese Richtung, allerdings haben nur vier Prüfplätze an diesem Nachfolgeversuch teilgenommen.

Ferner ist festzustellen, dass die Streuung der Ergebnisse bei der Ermittlung der Ausfallschwelle in der Größenordnung der Messunsicherheit liegt, die jedoch mit einem Vertrauensbereich von 95 % angegeben wird (also der doppelten Breite der Streuung). Zu erwarten wäre also – rein aus der Unsicherheit der Messkette zu schließen – nur die Hälfte der tatsächlichen Streuung. Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisunsicherheit bei der Durchführung einer Prüfung immer höher ist als die Unsicherheit der Messkette, da weitere Einflussfaktoren dazukommen. Da ist zum einen der konkrete Prüflingaufbau zu nennen, dessen Einfluss durch genaue Vorgaben und Fixierung der Leitungsführung minimal gehalten wurde. Auch der Prüfling selbst kann in seinem Verhalten als relativ stabil angesehen werden. Jedoch wurde durch die Vorgabe der Quantisierung der Pegelschritte zur zeitoptimierten Ermittlung der Ausfallschwelle ein möglicher Beitrag zur Vergrößerung der Unsicherheit bei der Ermittlung der Schwelle eingeführt. Noch größer jedoch als Beitrag für die Ergebnisstreuung kann die Entscheidungsschwelle sein, da ein gewisser subjektiver Einfluss des Prüfers zugestanden werden muss. Zudem kann die Entscheidung (leuchtet LED oder nicht?) von den Kontrastverhältnissen im Labor abhängen, die nicht überall in gleicher Weise angepasst werden können.

Die teilnehmenden Labore haben die Gesamtergebnisse erhalten und kennen die Ergebnisse ihrer Prüfplätze daraus. So kann jedes Labor feststellen, ob seine Ergebnisse innerhalb der üblichen Streuung liegen, und ob es systematisch im Vergleich zu anderen Laboren eher über- oder untertestet. Insbesondere kann es „statistischen Ausreißern“ nachgehen und anhand eigener Daten nach den Ursachen suchen, sich gegebenenfalls den Prüfling ein zweites Mal ausleihen und einen Verbesserungsprozess einleiten. Anhaltspunkte können Unregelmäßigkeiten in der Leistungskurve bei der Einmessung des homogenen Feldes, auffällige Inhomogenitäten des Feldes in der betreffenden Frequenz, Besonderheiten des Homogenitätsverlaufs im Bereich der Prüflingspositionierung oder auffällige Unterschiede im Einmessen des homogenen Feldes im Verlauf der Jahre sein.

4 Konsequenzen für den Prüfaufbau

Methodisch unbedingt näher betrachtet werden muss der auffällige Unterschied im Prüfergebnis zwischen SAC- und FAR-Testplätzen bei vertikaler Antennenpolarisation. Können diese Erfahrungen auf andere Prüflinge erweitert werden und müssen daraus Konsequenzen für die normativen Vorgaben für die Durchführung der Prüfung gezogen werden?

4.1 Aufbau von Tischgeräten

In [2] wird in Abschnitt 7.3 für alle Arten von Prüflingen gefordert, dass spezifizierte Leitungslängen verwendet werden sollen, und wo nichts gefordert wird, solle eine Minimallänge von 1 m dem Feld ausgesetzt werden. Für Netzanschlussleitungen wird keine spezifische Aussage getroffen. Besser ist hier die Beschreibung der neuen Fassung der Norm [3], Abschnitt 7.2, leider nicht im Text, aber in Bild 7. Es soll mindestens 1 m Leitungslänge dem Feld ausgesetzt, und die dazu bezugnehmende Zeichnung der Norm lässt diese zweckmäßigerweise horizontal ausgelegt über 1 m auf dem Tisch verlaufen, bevor sie senkrecht nach unten Richtung Boden geführt wird. Bei einem so aufgebauten Prüfling wird die höhere Einkopplung der Störgröße als anliegende Spannung im Prüfling sicher über das dem Gerät direkt angeschlossene Leitungsstück erfolgen, das horizontal verläuft. Aus den Erfahrungen der obigen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass bei einem vergleichbaren realen Prüfling die maximale Einkopplung über einen Leitungsabschnitt im gleichförmigen Bereich erfolgt und es zu keinen systematischen Unterschieden zwischen SAC und FAR kommt. Der Prüfling wird bei horizontaler Polarisierung am meisten beansprucht und gegebenenfalls ausfallen.

4.2 Aufbau von Standgeräten

Doch wie sähe es aus, wenn die empfindliche Elektronik nicht Teil eines Tischgerätes wäre, sondern in einem Schaltschrank eingebaut, der als Standgerät getestet würde? Insbesondere Standgeräte größeren Gewichts werden selten in FAR, sondern meist in SAC getestet. Abschnitt 7.3 in [3] verlangt dabei, die Fläche des Standgeräts innerhalb des gleichförmigen Bereichs zu „maximieren“ und verweist auf den informativen Anhang H als Leitfadens für den Prüfaufbau. Dort wird im Abschnitt H.1 für Prüflinge, die als Standgeräte von unten her mit der Stromversorgung verbunden sind, die verwegene These aufgestellt, dass in realen Installationen dann die Leitungen durch den Prüfling abgeschirmt würden und im Boden verlaufen. Das mag im Einzelfall mehr oder weniger zutreffend sein, eine Verallgemeinerung scheint jedoch seit der Erfindung mehrstöckiger Industriegebäude oder Stromverteilungen, die in räumlicher Nähe zum Verbraucher den Anschluss wieder nach oben z. B. in einen Verteilungsschrank führen können, nicht unbedingt angebracht zu sein. Besser – und wie es genau genommen auch noch den Vorgaben aus [2] entspricht – ist da schon die in vielen Laboren gepflegte Praxis, Leitungen, die unten in den Schaltschrank geführt werden und sich somit dem gleichförmigen Bereich entziehen, nach oben und über ein angemessenes Stück in den gleichförmigen Bereich zu ziehen, wie einige Teilnehmer aus ihrer Praxis bestätigten. Die hier beschriebene Vergleichsuntersuchung hat aber aufgezeigt, dass die dabei überwiegend vertikal verlaufende und unterschiedlich weit vom Geräteanschluss entkoppelte Leitung im Feld die Störgröße nur mit einer hohen Streuung abhängig vom individuellen Testplatz dem Prüfling nahebrächte – besser als die Leitung von vornherein auszublenden, aber nicht befriedigend im Hinblick auf reproduzierbare Prüfergebnisse.

Es wird als minimaler Ansatz in der neuen Ausgabe der Norm ein Satz vermisst, den Schrank – sofern im Hinblick auf Größe und Gewicht noch möglich – anzuheben, um eine Abdeckung im homogenen Feldbereich zu ermöglichen, die Anschlussleitungen über mindestens 1 m dem eingemessenen homogenen Feldbereich auszusetzen – wie dies noch in der alten Fassung vorgegeben war – und dies notfalls durch die Leitungsführung sicherzustellen, wenn eine Anhebung des Prüflings nicht möglich ist.

5 Ergänzungen, Schlussbetrachtung und Danksagung

Den teilnehmenden Laboren danken wir für die offene und unkomplizierte Zusammenarbeit, die Einhaltung der Terminplanung, der guten Dokumentation, die manch Frage schnell klären konnte, sowie manche Anregungen, die diese Versuchsreihe voranbrachten.

Literaturangaben

- [1] Scheck, Simon: Vergleichsuntersuchungen zwischen EMV-Laboratorien im Bereich der Störfestigkeitsprüfungen, emv - Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit – EMV 2018 in Düsseldorf, pp. 118 - 125
- [2] International standard IEC 61000-4-3:2006 + A1:2007 + A2:2010: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- [3] International standard IEC 61000-4-3:2020: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test